



TITLE:

第57回自然災害科学総合シンポジウム (2020年度防災研究所重点推進型共同研究) 講演論文集

AUTHOR(S):

CITATION:

第57回自然災害科学総合シンポジウム (2020年度防災研究所重点推進型共同研究) 講演論文集. 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 2020, 57: 1-58

ISSUE DATE:

2020-09-01

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/254341>

RIGHT:

第 57 回自然災害科学総合シンポジウム
(2020 年度防災研究所 重点推進型共同研究)

講演論文集

2020 年 9 月 1 日 (火)

主催

京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

第 57 回自然災害科学総合シンポジウム

－ 頻発する風水害と「新しい生活様式」 －

主 催： 京都大学防災研究所自然災害研究協議会
日 程： 令和 2 年 9 月 1 日（火）11 時 00 分～15 時 50 分（終了予定）
場 所： Zoom によるオンライン開催
参加費： 無料

プログラム

10：30～ 受付

11：00

開会挨拶 自然災害研究協議会議長 釜井 俊孝（京都大学防災研究所）

所長挨拶 橋本 学（京都大学防災研究所）

11：10～11：50

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和元年度報告】

「令和元年台風 15 号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」

丸山 喜久（千葉大学大学院工学研究院）

11：50～12：30

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和元年度報告】

「令和元年台風 19 号及び台風 21 号による広域災害に関する総合研究」

二瓶 泰雄（東京理科大学理工学部土木工学科）

12：30 昼食

13：30～14：00

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「2019 年 8 月の秋雨前線に伴う豪雨の特徴と佐賀県で発生した洪水災害の概要」

山本 晴彦（山口大学大学院創成科学研究科）

14：00～14：30

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「Flood triggered oil spills: Lessons from the Natech accident in Saga prefecture in August 2019.」

Ana Maria Cruz（京都大学防災研究所）

14：30～15：00

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「SAR 画像を用いた千曲川氾濫域抽出と浸水深推定」

朝位 孝二（山口大学大学院創成科学研究科）

15：00～15：30

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】

「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究

～コミュニティ・スクールを核とした防災まちづくり～」

佐藤 健（東北大学災害科学国際研究所）

15：30～15：50

・ 総合討論

・ 閉会挨拶

目次

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和元年度報告】

- 「令和元年台風 15 号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」 1
丸山 喜久（千葉大学大学院工学研究院）

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和元年度報告】

- 「令和元年台風 19 号及び台風 21 号による広域災害に関する総合研究」 9
二瓶 泰雄（東京理科大学理工学部土木工学科）

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

- 「2019 年 8 月の秋雨前線に伴う豪雨の特徴と佐賀県で発生した洪水災害の概要」 23
山本 晴彦（山口大学大学院創成科学研究科）

- 「Flood triggered oil spills: Lessons from the Natech accident in Saga prefecture in August 2019.」 34
Ana Maria Cruz（京都大学防災研究所）

- 「SAR 画像を用いた千曲川氾濫域抽出と浸水深推定」 46
朝位 孝二（山口大学大学院創成科学研究科）

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】

- 「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究
～コミュニティ・スクールを核とした防災まちづくり～」 53
佐藤健（東北大学災害科学国際研究所）

令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査

丸山 喜久

千葉大学大学院工学研究院

要 旨

科学研究費助成事業・特別研究促進費の助成を受け、令和元年台風15号（令和元年房総半島台風）によって引き起こされた様々な被害に関して、①停電の長期化の原因とその影響波及の解明（ライフライン分野）、②台風15号による被害発生の気象学的要因の解明（気象分野）、③建築物・工作物の被害メカニズムの解明および強風リスク評価（風工学分野）、④海岸・港湾施設の被害メカニズムの解明（海岸・港湾分野）、⑤内水被害の実態調査（水工学分野）、⑥航空交通システムへの影響の解明（航空交通分野）について、調査研究を実施し、報告書を取りまとめた。本報は、その成果をまとめたものである。

1. はじめに

令和元年（2019年）9月5日に南鳥島近海で発生した台風15号（令和元年房総半島台風）は、「非常に強い」勢力を保ったまま9月9日午前3時前に三浦半島を通過した。その後、東京湾を北東に進み、9日午前5時前に千葉県千葉市に上陸した。関東地方に「非常に強い」勢力を保ったまま台風が接近するのは極めて稀である。さらに、上陸時の中心気圧は960 hPa、千葉市中央区のアメダスが観測した最大風速と最大瞬間風速は、それぞれ35.9 m/s、57.4 m/sであり（気象庁、2020）、台風15号は、統計開始以来、最も強い勢力で関東地方に上陸したとみられている。

今回の台風でとりわけ大きな被害を受けたのは、現代の社会活動を支えている電力システムである。東京電力管内の1都7県に渡って最大約934,900戸（2019年9月9日7:50時点）で停電が発生した（電気新聞、2019）。9月11日6:30時点で千葉県と神奈川県の一部を除き停電は解消されたが、千葉県では停電が長期化し、9月17日13:00時点で約67,200戸が未だ停電していた（内閣府、2019）。さらに、停電の長期化の影響は深刻化し、熱中症による死者の発生、断水の長期化、携帯電話や固定電話回線等の通信障害など様々に波及し、停電災害と言える事態に陥った。

この台風によって、死者3名（2名の災害関連死者を含む）、負傷者150名の人的被害が発生した（2019年12月23日15:00現在）。また、千葉県を中心に神奈

川県、東京都、茨城県など広範囲で7万5千棟以上の住家被害や230棟の床上・床下浸水の被害が生じている（消防庁、2019）。この被害量は、2018年台風21号の被害を超えるものであった。さらに、首都圏の交通システムでは、台風による鉄道の運休や高速道路の通行止めが発生した。その影響を受け、成田空港では約13,300人が空港内に取り残されるなど非常に混乱した（成田国際空港株式会社、2019）。海上では、貨物船同士の衝突や護岸の走錨被害が報告されている。

そこで、令和元年度科学研究費助成事業「令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」（課題番号：19K24677）では、①停電の長期化の原因とその影響波及の解明（ライフライン分野）、②台風15号による被害発生の気象学的要因の解明（気象分野）、③建築物・工作物の被害メカニズムの解明および強風リスク評価（風工学分野）、④海岸・港湾施設の被害メカニズムの解明（海岸・港湾分野）、⑤内水被害の実態調査（水工学分野）、⑥航空交通システムへの影響の解明（航空交通分野）について、調査研究を実施した。本報は、その成果の一部をまとめたものである。調査結果の詳細は、研究代表者のホームページで公開している報告書（令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査研究班、2020）を参照されたい。

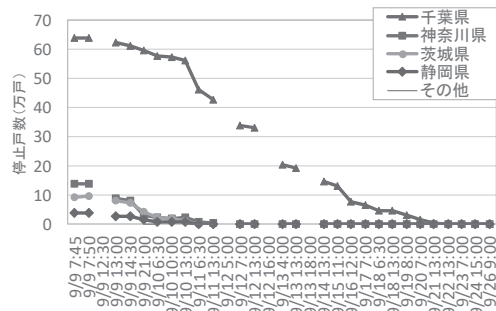


図-1 停電戸数の解消過程

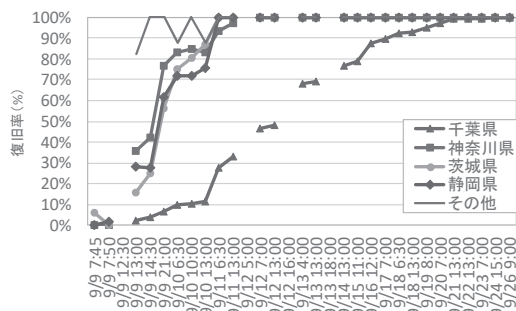


図-2 復旧率 = (最大停電戸数 - 停電戸数) / 最大停電戸数の推移

2. ライフライン分野

ライフライン分野では、電力、上水道、通信の機能支障およびその影響波及に関する調査を行っている。

2.1 ライフラインの機能支障

電力施設の主な被害は、送電線鉄塔の倒壊2基、支持物の折損・倒壊等1,996本、架空線の断線・混線等5,529径間、変圧器の損傷・傾斜等431台である。特に電柱倒壊の原因は、倒木・建物倒壊（約74%）、看板等の飛来物（約14%）、土砂崩れ等の地盤影響（約12%）による二次被害が大半であり、千葉県を中心に広域的に発生して長期間の停電の主要因となった。台風の接近に伴って、東京電力管内では千葉県を中心に停電が発生・拡大し、9月9日7時50分時点で最大停電戸数約934,900戸となった。県別の停電戸数の解消過程を図-1に示す。また最大停電戸数で正規化した復旧率を図-2に示す。千葉県の停電解消はかなり遅く、9月24日19時に復旧率がほぼ100%に達するまで約16日間を要した。ただしこれらの停電件数は高圧線の復旧状況に基づいており、低圧線や引込線の損傷による停電件数は含まれないため、停電がさらに長期化した需要家もある。

送電線鉄塔の倒壊は、富津火力発電所と新木更津変電所を結ぶ66kv系統木内線のNo.78,79の鉄塔2基で発生した。さらに、No. 80鉄塔の一部部材が変形し

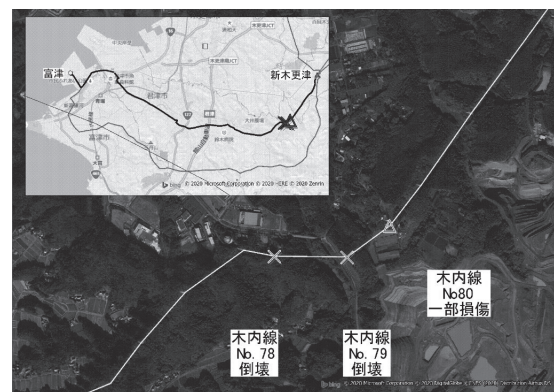


図-3 木内線（66kv 系統）の鉄塔倒壊（No.78,79）、一部損傷（No.80）の発生位置

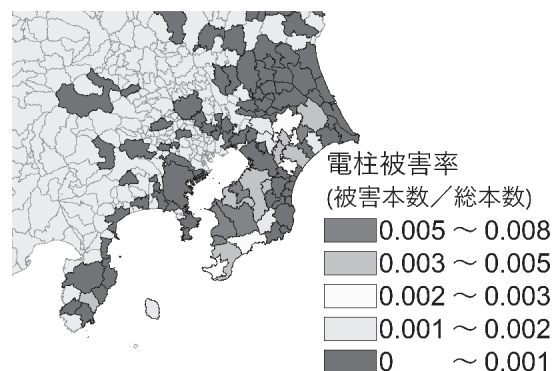


図-4 市町ごとの電柱の被害率

た（図-3）。これらの被害の原因は、No.78鉄塔付近で地形効果によって局地的に風速が増速されたことによって、鉄塔基部の部材が降伏したためとされている。配電施設の被害としては、電柱1,996本が傾斜、折損・倒壊するとともに、電線が5,529径間で断線・混線等が発生した。千葉県内の電柱の被害率（被害本数／総本数）は、袖ヶ浦市、香取郡多古町、君津市などで高かった（図-4）。電柱被害率は倒木や土砂崩れと非常に高い相関が見られたことから、今後は風況データに加えて倒木や土砂崩れ等の要因を加味した検討が必要である。

停電は他のライフライン施設の機能支障を引き起こした。千葉県内では15事業体22市町で断水が発生し、県内の断水戸数は133,474戸に達した。主な内訳は、山武郡市広域水道企業団で約65,000戸、かずさ水道広域連合企業団で約19,000戸、八匠水道企業団で約16,000戸などである。断水の原因は、停電による浄水場の機能停止等であった。停電戸数の減少に伴い断水戸数も減少し、9月22日12:00時点ではかずさ広域水道企業団で1,500戸、鋸南町で2戸となった。断水期間は9月9日から最長で9月25日までの17日間であった。

ソフトバンク株式会社の携帯電話通信に関しては、発災直後の9月9日13時30分時点で、停波基地局数は592、エリア支障は18の市町村に及んだ。千葉県館山市、南房総市、富津市、君津市、鴨川市で、強風そのものや強風による飛来物・倒木、さらに斜面崩壊や道路損壊等を原因とした甚大な被害が生じた。その後、継続的な停電による影響（停電支障）を受け、翌9月10日7時において停波基地局数は759に及び、エリア支障は52の市町村まで拡大し停波のピークを示した。電力の復電や応急復旧活動により、9月11日には停波基地局数は600まで低減させることができ、エリア支障の市町村も同様に30前後まで大きく低減された。9月18日17時38分をもって、エリア支障が生じていた全ての市町村で応急復旧が完了した。

2.2 ライフラインの機能支障による市民生活への影響

台風15号による建物被害や停電・断水といったライフライン機能被害が千葉県内の医療機関に与えた影響に関してアンケート調査を行った。対象とする医療機関は千葉県医師会に所属している2061の医療機関より、病院、医療センター・メディカルセンター241機関と、5名以上の協力医師が所属している医院、クリニック、診療所108機関の合計349機関を選定しアンケート調査を行った（回収率24.9%）。ライフラインの機能停止による設備の使用制限があった機関の割合は84%に達した。医療機能で最も大きな影響を受けた設備は放射線関連機器であった。検査機器や放射線関連機器の使用不可により、外来の診療を制限または休診したと回答した機関が多く、これらの設備が医療機能に与える影響は大きかった。停電時に自家発電や非常電源コンセント、非常灯などの代替設備を使用している機関が多くあったが、平常時の電力量の全てをまかなうことはできず、設備の使用が制限されることとなった。

台風15号による停電の長期化にともなう生活への影響波及、ライフライン停止に起因する生活支障の実態について明らかにすることを目的として、インターネットによる質問紙調査を実施した。図-5に、各生活活動の復旧時期について、回答者の累積割合の時系列変化を示す。図中には、電気と水道の復旧の過程も併記している。洗面・歯みがきとトイレは、台風来襲当日に支障が発生した割合は4割を下回り、それ以外の生活活動は5割以上の回答者に支障が発生しており、その後の復旧割合のスピードも大きく異なる。生活活動とライフライン（電気、水道）の復旧の累積推移を見ると、支障が発生した割合が多かった料理、通信、夜間暗い中で生活、入浴、洗濯では、水道の復旧過程ではなく、電気の復旧の過程と連動

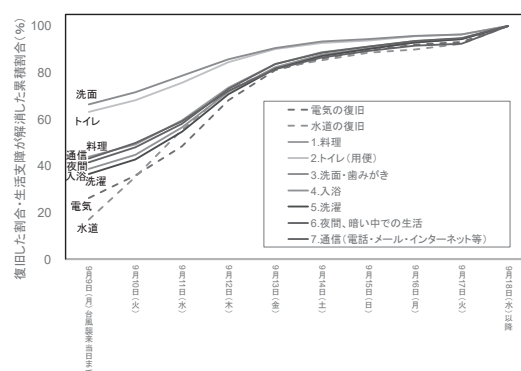


図-5 生活活動とライフラインの復旧割合の時系列変化

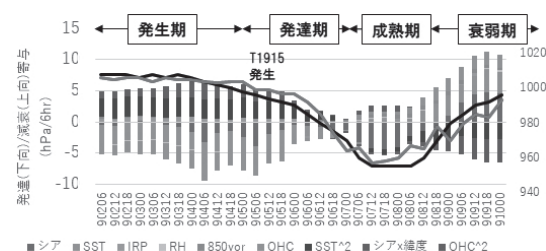


図-6 主要説明変数の台風 15 号の中心気圧への寄与値時間変化

している様子が見てとれる。このことから、台風15号でのライフライン停止による生活支障への影響は停電が大きく関連していたことが推察できる。

3. 気象分野

気象分野では、2019年台風15号の勢力が衰えることなく関東に接近、上陸した要因の解明、暴風・突風の実態解明、台風の降水分布や風速場の特徴の解明等を目的とし、調査研究を行った。

3.1 台風15号の発生・発達における環境場の影響

ベストトラックと早期ドボラック法の結果、台風発生環境場診断手法Typhoon Genesis Scores (TGS) の気象庁 (JMA) 版であるJMA-TGSと、統計力学的強度予報Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) の気象庁版である気象庁強度予報ガイダンスTyphoon Intensity Forecast scheme based on SHIPS (TIFS) を用いて、台風のライフサイクルに対する環境場の寄与を定量的に示した。これによって、台風15号の勢力が衰えることなく関東に接近・上陸した要因を検討した。

台風15号は、発生期から発達期前半までは顕著に発達しなかったが、台風発生環境場は偏東風波動パターンであり、その統計的な特徴を持っていた。発

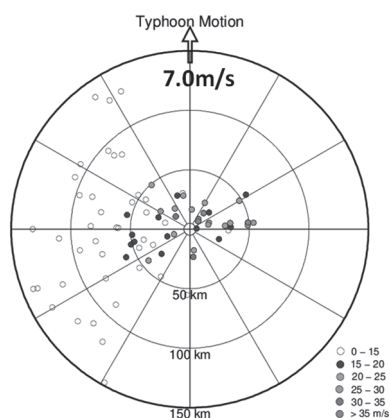


図-7 アメダスの各観測点で観測された最大風速の台風中心・移動方向に対する相対表示

生期における上層の寒冷渦の存在，または偏東風波動の北偏により，台風は西進しながら日本に接近する。その後，発達期を迎えて台風急速発達（Rapid intensification：RI）が発生したが，これには高い海面水温（SST）と海洋貯熱量（OHC）という環境場が大きく貢献した（図-6）。また，台風15号のサイズが小さいことで，内部プロセスが重要な役割を果たしたと考えられる。一方，成熟期から衰弱期では，衰弱過程が弱くなる環境場であった。台風15号が日本に接近・上陸することでSSTとOHCは衰弱の寄与に変わるが，それに匹敵する鉛直シアの小ささが発達に寄与していたことで，台風15号の勢力が衰えなかった。

3.2 地上観測データを用いた防風・突風の解析

令和元年台風15号に伴う防風・突風の実態を明らかにすることを目的とし，気象庁アメダスによる地上観測データ等の分析を行った。台風15号の最大風速（10分平均風速）は神津島村で43.4 m/s，千葉市で35.9 m/s，羽田で32.4 m/s，最大瞬間風速（3秒平均風速）は神津島村で58.1 m/s，千葉市で57.5 m/s，木更津市で49.0 m/sを観測するなど，関東地方を中心に多くの地点で観測史上1位の記録を更新した。これらの強風は台風のトラック近傍の左右両側で観測されていた。全般に沿岸部や島嶼部で風速が大きくなっているが，千葉や木更津などでは東南東から南東の風となっており，陸側からの風にも関わらず記録的な強風となっていたのも特徴の一つである。

アメダスの各観測点において観測された最大風速を台風中心・移動方向に対して相対的にプロットしたものを図-7に示す。但し，台風の進行方向が図の上向きである。これによると，台風中心を通る東西線付近に集中してプロットされており，多くの地点で台風の最接近時に最大風速が観測されていたと言える。また，強い最大風速は台風中心近傍に集中して

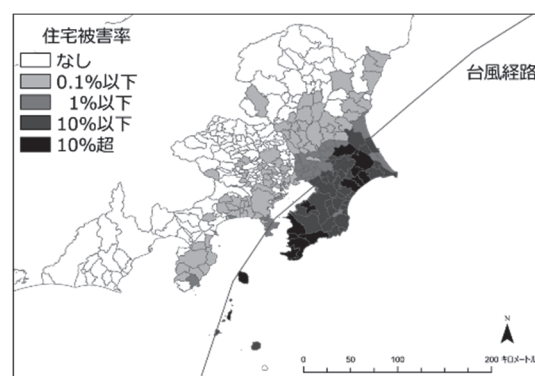


図-8 台風15号による市町村別住宅被害率

おり，かつ台風中心近傍の進行方向左側を含め全象限にわたって見られるのが特徴である。これは発達した台風のコア構造を有していたことを示唆している。

関東へ襲来する台風において台風15号のように発達した成熟期の構造を維持したものはどのくらい稀であるのかを明らかにするために，1994年以降に東京湾付近を通過した台風について気象庁ベストトラックデータを用いて抽出を行った。抽出された台風のアメダスで観測された最大風速を図-7と同様に評価すると，台風中心から半径25 km以内において最大風速25 m/s以上が観測された台風を抽出すると，2019年台風19号，2019年台風15号，2004年台風22号，2001年台風15号の4つしかないことが明らかになった。

4. 風工学分野

風工学分野では，台風15号に伴う強風による建築物・工作物の被害調査，住家の居住環境に関する調査，2018年台風21号における被害との比較等の調査研究を行った。

4.1 建物被害の概要

2020年3月5日時点の千葉県の報告によれば，千葉県内では，全壊404棟を含み全被害住家数は74,407棟を超えていた。図-8に市町村別の住家被害率を示す。ここでの住家被害率とは，一部損壊以上の被害を受けた住家を世帯数で除した値である。

被害住家数に着目すると人口密度の高い千葉市や市原市での被害が多いが，被害率に着目すると房総半島の南西部と東京都の島しょ部での被害が顕著であった。最も住家被害率が高かったのは千葉県鋸南町の63.9%で，房総半島での被害は南房総市31.6%，館山市27.4%と続く。島しょ部では新島村の被害率が38.7%であった。

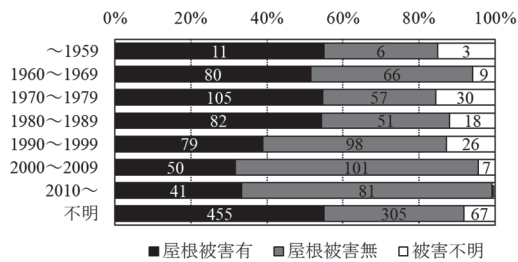


図-9 建築年代ごとの屋根被害の有無

4.2 強風による住宅被害状況

2019年11月8日から11月11日までの4日間にわたって、千葉県鋸南町、南房総市および館山市の一部地域で台風による住宅の現地被害調査を行った。調査対象住宅は鋸南町528棟、南房総市600棟、館山市701棟の合計1,829棟で、目視調査およびヒアリング調査を行った。

調査地区の対象住宅に着目すると、2階建てが7割を占め、9割が一戸建て住宅であった。また、ほぼ全ての住宅が木造である。屋根形状は切妻が6割、寄棟が約3割だった。約6割の住宅が瓦葺き屋根を持つ。被災住宅および屋根被災住宅の構造特性に着目すると、屋根被災住宅では瓦葺き屋根の割合が顕著に増大した。一方で、金属屋根やスレート屋根の被害は少ない。外壁に着目すると、被災建物ではサイディングの割合が減少し、モルタル、トタンおよびALCの割合が増加した。建築年代が新しくなるにつれて瓦屋根の割合は徐々に減少し、1980年ころからサイディングを使用した住宅の割合が増加していることを踏まえると、建築年代は強風被害に影響を与えるものと考えられる。図-9に建築年代ごとに屋根被害の有無を割合で示す。どの年代でも瓦屋根に屋根被害が多く発生しているが、1990年代を境に屋根被害発生割合は50%程度から30%程度に減少している。2010年以降に建てられた住宅にも大きな被害程度のものであったが、建築年代が新しくなるにつれて、屋根の被災要因に「物が飛んできた」との回答が増えた。古い住宅が強風によって被災することで飛来物が発生し、周辺の比較的新しい住宅にも被害をもたらしていると考えられる。

5. 海岸・港湾分野

海岸・港湾分野では、沿岸部の高波被害、船舶の漂流被害等に関する調査研究を行った。

5.1 高波被害

神奈川、千葉、茨城の沿岸部の現地調査を行い、高

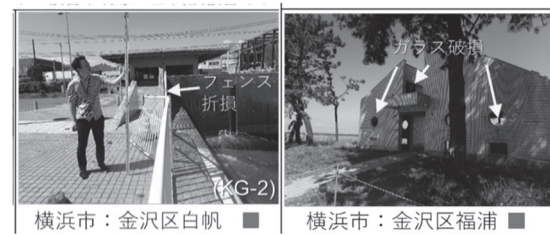


図-10 横浜市金沢区の高波被害

波被害の概要をまとめた。神奈川では、明らかな高波被害が東京湾に面した横浜市中区や金沢区の港湾区域で確認された。本牧ふ頭や横浜ベイサイドマリーナ近くでは、越波により護岸上のフェンスが倒れていた（図-10）。横浜市金沢区で浸水が発生し始めたのは、9月9日午前2時頃である。同時刻の横浜新港検潮所（海上保安庁所管）の観測潮位T.P.+0.51mを基準に潮位補正を施すと、観測潮位上1.95m、すなわちT.P.+2.46mまで少なくとも波が達したと推定される。金沢区福浦地区では、東側の護岸の一部が決壊し、越波・越流により背後の工場地区で大規模な浸水被害が発生した。

千葉では台風通過4日後に、銚子から南房総までの九十九里浜・外房の範囲、館山から金谷までの南房総・内房の範囲で調査を実施した。銚子漁港、片貝漁港、勝浦漁港、小戸漁港、金谷港などを踏査したが、護岸や防波堤など外郭施設で目立った被害は見られなかった。このように、千葉の高波被害は全体的には軽微であった。

茨城では、台風通過3日後に県北の日立から調査を始めて、利根川河口に位置する神栖市波崎までの範囲を踏査した。日立港や大洗漁港、鹿島港など太平洋に面する港を確認して回ったが、港内より目視で確認できる範囲で高波や高潮による明瞭な被害は見られなかった。

5.2 船舶の漂流被害

台風時における船舶の漂流に着目し、2019年台風15号および19号を対象に東京湾における船舶規模と走錨距離の関係について検討した。300 総トン数以上の国際航海に従事する船舶、500 総トン数以上の国際航海に従事しない船舶に搭載が義務付けられているAIS (Automatic Identification System: 船舶自動識別装置)のデータを用いて、台風時の風場や移動速度との関係を分析した。

図-11に、台風15、19号時の船舶規模と移動距離の関係を示す。なお、船舶の全長50 m毎、重量5,000 t毎に移動距離の最大値と最小値を示している。台風19号時に比べ、台風15号時の方が移動距離が長いこと

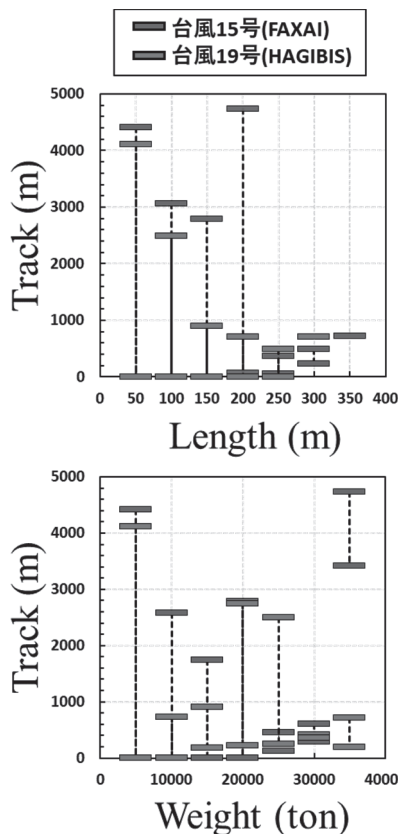


図-11 船舶の全長および重量と移動距離の関係

がわかる。これは、台風15号は移動速度が遅く、長く湾に停滞しており、結果として船舶への風の作用時間が長かったことが挙げられる。また、台風15号時は、全長200 m級、重量30,000 ～35,000級の船舶の移動距離が長い、全体的な傾向としては、船舶規模が小さい方が移動距離が長く、走錨距離も長かったことがわかる。

6. 水工学分野

水工学分野では、台風15号と台風19号および台風21号における千葉県における浸水メカニズムの比較、千葉縣市川市での避難状況に関する調査研究を行った。

6.1 千葉県における浸水メカニズム

令和元年台風15号、台風19号、10月25日の大雨（以後、1025R）により、千葉県の多くの地域で河川氾濫や浸水被害が報告された。大雨による浸水は、①小水路から水が溢れたことによる浸水、②支川の氾濫などによる浸水、③支川と本川の合流部付近の氾濫などによる浸水、④本川の氾濫などによる浸水の4つに分類される。この浸水パターンを累加雨量(mm)と降雨勾配(=累加雨量(mm)/降水時間(h))を用いて評価することを試みた。

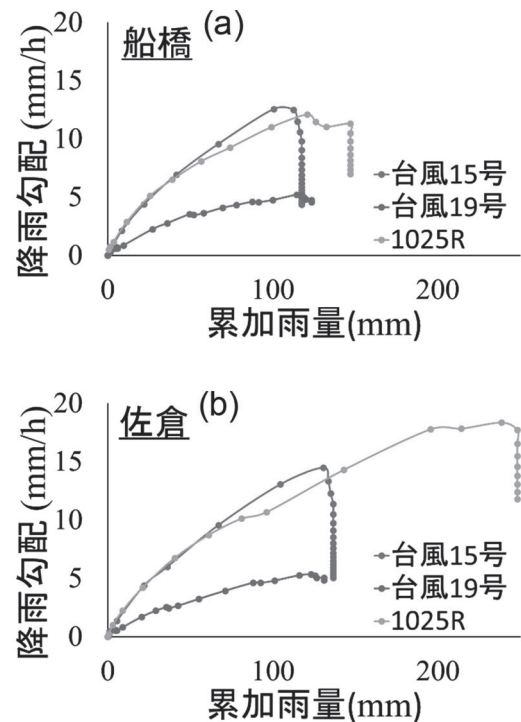


図-12 浸水・河川氾濫危険度判定図

船橋市では台風15号で浸水被害が生じたが、1025Rでは生じなかった。図-12(a)より、1025Rと比較して、台風15号は降雨勾配が大きい。したがって、降雨勾配12～12.5の間に河川流入前に氾濫が発生する限界が存在し、台風15号ではその限界を超えたときに浸水が発生したと考えられる。佐倉市では台風15号では浸水被害が生じ、1025Rでは浸水被害と鹿島川、高崎川で河川氾濫が生じた。図-12 (b)より台風15号と1025Rは降雨勾配が大きい。さらに、1025Rは累加雨量が著しく大きい。台風15号、1025Rともに降雨勾配の限界を超えて浸水被害が生じたと考えられる。

6.2 千葉縣市川市の水害と避難状況

台風15号、19号、21号においては、市川市では規模は異なるものの市内において内水被害が生じている。そこで、千葉縣市川市を対象として、(1) 水害状況と避難状況との比較、(2) 水害間の避難状況の変化、に焦点をあて、それらの調査結果を行った。

図-13に、台風15号時の時間降雨量、避難情報発令状況の時系列を示す。冠水に伴う道路規制地区は計6ヶ所に及んでおり、大柏川合流後の真間川右岸側(鬼高地区)で比較的広範囲で冠水が生じた。また、市が発令した避難情報として、9/9 4:40、5:53の計2回、国分川付近、大柏川付近に警戒レベル4の避難勧告が発令されている。このような状況下で、9/8 16:00に6箇所の自主避難所が開設され、9/9 9:00に閉鎖されるまで避難者数は最大で18名であった。

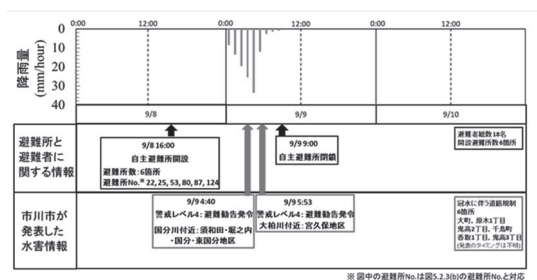


図-13 台風15号時の時間降雨量、避難情報発令状況の時系列

この避難者数を台風19号、21号と比較すると、台風19号時の総避難者数(2258名)が台風15号(18名)、21号(15名)と比較して突出して多くなっている。降雨、浸水状況、市内河川水位は、これら3つの台風で概ね同程度であったが、台風15号から台風19号にかけては総避難者数が急増し、台風19号から21号にかけては総避難者数が急減している。この原因として、台風15号では市内の6箇所において冠水被害が生じたことで、約1カ月後に生じた台風19号の際に、先だって生じた台風15号の内水氾濫による浸水被害の災害履歴が周辺住民の避難判断にプラスに働いた可能性が考えられる。一方、台風19号から21号にかけて総避難者数が急減した原因としては、同程度の降雨、市内の河川(真間川)水位を記録している台風19号を2週間前と直近に経験していることで、警戒レベル4の避難勧告が発令されているにもかかわらず、避難意識の薄れが生じた可能性が考えられる。

7. 航空交通分野

航空交通分野では、成田国際空港における利用者滞留問題、航空貨物輸送への影響、離島交通への影響に関する調査研究を行った。

7.1 成田国際空港における利用者滞留

2019年9月8日深夜から9日にかけて関東地方を縦断した台風15号の影響により、成田国際空港(以下、成田空港)へのアクセス交通が途絶したため、一時最大で1万7千人に及ぶ利用客が空港内で足止めを余儀なくされた。関係資料及び成田空港株式会社(以下、成田空港会社)へのヒアリングに基づく成田空港会社の対応を整理する。

台風15号は、9月8日の深夜から9日の朝にかけて関東地方を縦断すると予想されていた。成田国際空港としては、9月8日の時点では、まだ深刻な滞留問題が発生することを予想していなかった。台風15号は成田空港に9日夜半から明け方にかけて最接近し、午前3時48分には「飛行場暴風警報」が発令された。9日

午前6時の時点での平均風速が20.9m/sであり、離発着を行うための施設には特に損傷被害がなかったため、9日の朝から基本的には離着陸できる状態であった。成田国際空港BCPに基づく総合対策本部は、暴風警報の発令が未明で関係人員の招集が事実上困難であり、午前7時36分には暴風警報が解除され強風警報に切り替わったことから、本部は立ち上がったもののメンバーが参集しなかった。その後、風が収まり到着便の受け入れが始まった。

このため、到着便の旅客を移動させる必要があったが、問題は交通機関が全く麻痺していたことであった。台風15号の際に首都圏の鉄道各線は前日から計画運休を行ったものの、9日午前8時ごろからは運転が再開できるとの見通しを示していた。しかし、暴風による倒木や架線等の設備被害等の影響で成田空港と都心とを結ぶ交通アクセスは完全に麻痺した。

さらに、着陸便の受け入れを続けたことと、交通アクセスの不通により出発便のためのクルーが到着できず、多数の遅延が生じたことが重なり、到着機から降りた旅客はターミナル内に留め置く必要が生じ、一時1万3000人を超える滞留者の発生につながった(単純計算で50便程度の旅客が滞留していたことになる)。その後、夕方になり、京成アクセス線は17時37分に運転を再開、道路網も新空港道・圏央道が16時45分に、東関東道も22時10分に通行止めが解除されて高速バスも少しずつ動き出したが混乱は続いた。9日には約1万3300人が空港内で一夜を明かすことを余儀なくされた。

成田空港会社としては、「滞留問題が顕在化した後も、鉄道や道路がどの時点で再開するのか、見通し情報が全く伝わってこなかったため、独自ルートで集める必要があった」と認識している。一方で、航空局としては鉄道局から運行情報などを収集して成田空港会社に提供していたとしており、対策本部が設置されていなかったことが原因で、提供された情報が一元化されず活用、利用者への情報提供に活かされていなかった可能性がある。

滞留者に対しては、空港側から食料、飲料水、毛布などの提供を行ったが、全く十分ではなかった。滞留者への情報提供も十分ではなかった。成田空港会社の職員が、鉄道の運行情報など、交通に関する情報を発信していたものの、あまりに多くの乗客がいたため、情報が行き渡らなかった可能性がある。また、多言語での情報発信も、うまくいっていなかった。

翌日、臨時バスを運行し、JRは成田～成田空港間を10日6時に再開、成田～我孫子間も7時に再開し、ようやく事態が収拾に向かった。ただし、この正常化にかけても運行再開などの情報提供はJRからなさ

れたものではなかった。今回の反省として、情報の共有が全く機能していなかったことが挙げられる。事態の深刻化に備えて、もっと前の段階で安全側に対応することを考えておく必要があった。また、対策本部の設置においては、空港の状況に基づいたものではなく、アクセス交通の状況も含めた判断を行う必要があることが今回の教訓となった。

7.2 航空貨物輸送への影響

成田空港は、わが国の航空貨物拠点として主要な役割を果たしており、その重要性はさらに高まっている。2018年の統計に基づけば、全国の輸出額に占める成田空港のシェアは14.1%、全国の輸入額に占める成田空港のシェアは16.6%である。また、近年の傾向をみても、輸出額については前年比2.6%増、輸入額では前年比11.9%増と急速に伸びている。台風15号では、物流施設及び航空貨物のための空港施設に大きな損壊は生じなかったが、南エリアが属する芝山町において倒木による大規模な停電が発生し、荷物を管理するコンピューターシステム、荷さばき施設、冷凍冷蔵保管などの機能が失われ、一時的に大きな影響が出た。

2019年9月の港別輸出入額を見ると、成田空港の輸出額は前年同月比77.1%となっている。一方、成田空港の輸入額の方を見ると前年同月比98.1%となっており、輸入貨物に関しては台風15号の影響が顕著にあったとは判断できない。成田空港の離発着は可能であり、輸入貨物は成田空港での受け入れが継続していたことがその理由と考えられる。しかし、成田空港に下ろされた荷物が荷さばきされるまでの作業は、通常通りには進んでおらず、配送の遅延や品質劣化など、統計上の金額ベースでは現れない損失が出ていた可能性がある。

8. まとめ

令和元年台風15号（房総半島台風）によって引き起こされた長期停電や風水害に関する調査結果の一部を報告した。研究代表者のホームページで成果報告書を公開しているので、個々の研究成果の詳細はそちらを参照されたい。

台風15号によってもたらされた停電によって、電力依存社会の抱える脆弱性が次々と露見された。こ

のことから、停電の長期化による影響波及に関する調査研究は、風水害の防災対策のみならず、今回と同様に大規模な停電が懸念される首都直下地震や南海トラフ巨大地震などの地震対策にも非常に重要な知見をもたらすものと考えられる。また、本研究の成果は、近年風水害が頻発し、その被害が激甚化している我が国の防災・減災対策の立案に大きく貢献できるものと期待される。

謝 辞

本稿は、特別研究推進費「令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」（課題番号：19K24677）の助成を受けて実施した調査研究の一部をとりまとめたものである。本研究を行うにあたり、関係機関および台風の被害に遭われた方々には、調査等に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 気象庁（2020）：災害時自然現象報告書，
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_202002.pdf
- 消防庁（2019）：令和元年台風第15号による被害及び消防機関等の対応状況（第40報），<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/taihuu15gou40.pdf>
- 電気新聞（2019）：台風15号被害——オール電力で挑んだ停電復旧の軌跡，<https://www.denkishimbun.com/sp/44771>
- 内閣府（2019）：令和元年台風第15号に係る被害状況等について，<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/index.html>
- 成田国際空港株式会社（2019）：台風・豪雨災害の経験を次に活かして対策を講じ成田国際空港BCPにも反映，GREEN PORT REPORT，https://www.naa.jp/jp/issue/greenport/2019_12/pdf/01.pdf
- 令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査研究班（2020）：令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査報告書，<http://ares.tu.chiba-u.jp/typhoon15/>

令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究

二瓶泰雄¹・仲江川敏之²・中北英一³・竹見哲也³・山田朋人⁴・三隅良平⁵・飯塚 聡⁵・
鈴木真一⁵・柳瀬 亘²・立川康人³・田中茂信³・佐山敬洋³・田中智大³・朝位孝二⁶・
清水義彦⁷・前野詩朗⁸・田中 仁⁹・吉谷純一¹⁰・田中規夫¹¹・泉 典洋⁴・
矢野真一郎¹²・森脇亮¹³・赤松良久⁶・内田龍彦¹⁴・重枝未玲¹⁵・岩崎理樹⁴・
小山 毅¹⁶・長谷川兼一¹⁷・西嶋一欽³・藤本郷史¹⁸・毛利栄征¹⁹・前田健一²⁰・
岡村未対¹³・卜部厚志²¹・森口周二⁹・蝦名裕一⁹・松四雄騎³・王功輝³・竹林洋史³・
鈴木素之⁶・田島芳満²²・佐々木淳²²・信岡尚道¹⁹・森 信人³・有川太郎²³・
鈴木崇之²⁴・下園武範²²・松井正宏²⁵・小林文明²⁶・畑山満則³・牛山素行²⁷・
佐藤 健⁹・梶谷義雄²⁸

- 1 東京理科大学
- 2 気象庁気象研究所
- 3 京都大学
- 4 北海道大学
- 5 防災科学技術研究所
- 6 山口大学
- 7 群馬大学
- 8 岡山大学
- 9 東北大学
- 10 信州大学
- 11 埼玉大学
- 12 九州大学
- 13 愛媛大学
- 14 広島大学
- 15 九州工業大学
- 16 東京電機大学
- 17 秋田県立大学
- 18 宇都宮大学
- 19 茨城大学
- 20 名古屋工業大学
- 21 新潟大学
- 22 東京大学
- 23 中央大学
- 24 横浜国立大学
- 25 東京工芸大学
- 26 防衛大学校
- 27 静岡大学
- 28 香川大学

要 旨

令和元年台風19号では、東日本の非常に広い範囲で長時間の豪雨をもたらし、大規模な洪水氾濫が発生すると共に、台風による過去最多の土砂災害件数、竜巻などの強風被害、記録的な高潮・高波被害が発生し、甚大な人的・物的被害が生じた。その約2週間後には、

日本南岸の低気圧と台風21号による大雨が発生し、千葉県や福島県などにて洪水氾濫が発生した。本研究では、科研費・特別研究促進費による突発災害調査研究により、台風19号、21号による広域災害について、全国から多分野の研究者が集結した総合研究を実施した。本報はその成果の一部を取りまとめたものである。また、今後に向けての提言も一覧できる形でまとめている。

1. はじめに

令和元年（2019年）10月6日に南鳥島近海で発生した台風19号（Hagibis、その後、令和元年 東日本台風と命名（気象庁、2020））は、マリアナ諸島を西に進みながら、中心気圧が一日で77hPa低下する「急速強化」が生じ、大型で猛烈な台風に発達した。その後、台風は進路を次第に北寄りに変え、12日19時前に大型で強い勢力（中心気圧960hPa）で伊豆半島に上陸し、その後、関東地方を通過し、13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わった。

台風本体の発達した雨雲が非常に広い範囲で長時間の豪雨をもたらした。静岡県や新潟県、関東甲信・東北地方を中心に広い範囲で記録的な大雨が発生した。10日からの総雨量は神奈川県箱根町で1000mmに達し、関東甲信地方と静岡県の17地点で500mmを超え、大雨特別警報が1都12県（静岡県、神奈川県、東京都、埼玉県、群馬県、山梨県、長野県、茨城県、栃木県、新潟県、福島県、宮城県、岩手県）で発令される状況となった。風について、千葉縣市原市では竜巻と推定される突風が発生すると共に、最大瞬間風速40メートルを超えたのは7地点（関東地方）となった。波に関しては、波高が静岡県石廊崎で13メートルを超え、高潮については、静岡県や神奈川県、伊豆諸島で過去最高潮位を超える値を記録した。

この記録的豪雨により、広範囲にわたる多くの河川において堤防決壊と越水・氾濫が発生しており、堤防決壊したのは71河川、142箇所を上り（国交省、2020）、浸水面積は少なくとも3万5千haとなった（国交省、2019）。合わせて、土砂災害や関連する浸水被害も各地で同時多発的に発生した。これにより、人的・物的被害は甚大となった。さらに、大雨や暴風等により、電気・水道・道路・鉄道施設等のライフラインへの被害が発生すると共に、航空機や鉄道の運休等の交通障害が発生した。特に、千曲川の氾濫により、長野県長野市における新幹線車両基地が浸水し、北陸新幹線の全体の約1/3の車両が水没するなど、甚大な被害となった。

この台風19号上陸から約2週間後の10月25日には、日本南岸の低気圧と台風21号（以下では、単に台風21号による大雨と称す）から暖かく湿った空気が関東南部に入り込み大気が不安定となり、千葉

県・茨城県・福島県を中心として大雨が降り、わずか半日で10月の1カ月の平年降水量を上回る地点が発生した。この大雨により、千葉県・福島県を中心に27河川の氾濫が確認された。これらの被災地域は、台風15号や19号の被災地と重なっており、復旧工事が十分行き届かない段階で再び災害が発生したことになる。

本研究では、令和元年台風19号及び台風21号による広域災害の被害状況・メカニズムの全容を明らかにすることを目的として、被災地域の研究者だけでなく全国の研究者が集結し、多様な専門性を持つオールジャパンの災害研究チームによる文理融合の調査研究を行うものとする。

2. 研究内容と研究体制

本研究では、①台風による豪雨・流出現象の気象学的解明（気象グループ、水文グループ）、②広域にわたる洪水氾濫災害を引き起こしたメカニズムの解明（河川グループ、建築グループ、農業グループ）、③多発した土砂災害・土構造物破壊におけるメカニズムの解明（地盤グループ）、④強風や高潮による被害実態の解明（高潮・高波グループ、強風グループ）、⑤住民の避難行動の実態と防災情報の伝達状況の把握（避難・経済被害グループ）、の5つのテーマ・9つのグループ、に分けて活動した。

各調査研究グループの調査方法や解析等については以下に示す通りとなっている。なお、各調査研究グループには研究推進を担当するグループリーダーを配置し、併せて総合的な研究実施体制を強化するために、分担者の専門分野を考慮して各グループを兼任する研究者を配置している。以下において研究者に付した下線はグループリーダーを示している。

- ① 気象グループ（仲江川、中北、竹見、山田、三隅、飯塚、鈴木、柳瀬）・水文グループ（立川、田中茂、佐山、田中智）

Xバンドレーダを始めとする気象レーダー、解析雨量、メソ解析などの様々な降水・気象観測データを用いて、台風・低気圧の構造、発生環境から、極端豪雨発生のメカニズムにアプローチする。また、高解像度非静力学モデルによる台風シミュレーショ

ンによる感度実験を通して極端豪雨のメカニズム・要因解明を行う。温暖化影響については、大量アンサンブル過去・将来気候ダウンスケール実験から類似の極端事象の発生頻度を調査する。また、関東、甲信越、東北地方の河川流域において、2019 年台風 19 号を対象とした降雨流出解析および降雨・流量の水文頻度解析を実施し、今回の豪雨の規模を明らかにするとともに、現地調査を実施して、同様の台風による被害を最小化するための技術的課題を明らかにする。

② 河川グループ（朝位，清水，前野，田中仁，吉谷，田中規，泉，矢野，森脇，赤松，内田，重枝，岩崎）・建築グループ（小山，長谷川，西嶋，藤本）・農業グループ（毛利）

令和元年台風 19 号および後日の低気圧（台風 21 号を含む）によって関東，甲信，東北地方の各地で甚大な氾濫被害が発生した。その被災規模は平成 30 年西日本豪雨災害を上回るものとなった。このような氾濫被害に対して本グループでは河川工学，水理学の見地から氾濫の発生メカニズムや被害拡大の要因を解明する。まず，各地で発生した氾濫の現地調査を実施する。また衛星画像解析，氾濫シミュレーション，水文データ解析などを行い破堤や氾濫メカニズム，氾濫流の動態を明らかにする。さらに西日本豪雨災害との比較検討も行う。一方，研究事例が少ない洪水による建築物の被害を，防災，河川工学，構造，材料，環境の観点から分析し，知見の蓄積を行う。被災地の被害状況を調査することで浸水要因を特定し，降雨流出氾濫解析により浸水状況の再現解析を行い，被災建築物の構造材・非構造材被害と照らし合わせて分析する。また，浸水した建築物の継続的使用を踏まえ，浸水による，構造躯体，断熱材などの材料および室内の衛生環境への影響を調査分析する。さらに，洪水氾濫に伴う農業被害の特徴やその要因，対策について調査分析を行う。

③ 地盤グループ（前田，岡村，卜部，森口，蝦名，松四，王，竹林，鈴木）

斜面の崩壊・土石流などの発生状況，河川堤防や道路等の土構造物の被災状況を把握するため，踏査，原位置試験，UAV 等を活用した多角的な現地調査を行う。河川堤防の堤体部や道路盛土部は増築，改良，補強等が施された多様な人工構造物であることに加え，基礎地盤や自然斜面は地形・地質や気象の影響を受けた複雑な自然堆積物である。そこで，地球物理，地形学，地質学，地盤工学，土地利用に関する史学の学際的な視点から地盤災害メカニズムを解明

する。

④ 高潮・高波グループ（田島，佐々木，信岡，森，有川，鈴木，下園）・強風グループ（松井，小林）
本グループでは，まず，主に駿河湾，相模湾，東京湾，外房の沿岸部における台風 19 号に伴う高潮・高波による浸水や海岸構造物や家屋の直接的な被災の調査に加え，避難の実態調査，河口部における水位上昇に伴う影響評価，さらに洪水により発生した大量の漂流ゴミの集積実態とそれに伴う漁業への影響を把握する。また，同年の台風 15 号や 2018 年台風 21 号，24 号などの過去の台風に伴う高潮・高波災害との比較を通じ，本災害の特徴を明らかにする。また，台風 19 号に際して発生した強風について，その実態と建築物や構造物等の被害への影響を調査し，今後の気象災害低減に資する情報としてまとめる。今回の台風の影響は豪雨の影響が強いため，建築物等の受けた影響のなかから強風によると思われるものを抽出する。また，台風に伴って発生することがある竜巻の被害についても現地調査等を実施して，整理する。

⑤ 避難・経済被害グループ（畑山，牛山，佐藤，梶谷）

台風 19，21 号では，死者 104 名（うち，災害関連死 7 名），行方不明者 3 名を出す大規模な災害となった。災害救助法適応地域は 315 市区町村にわたり，241 市区町村が適応対象となった東日本大震災を超える広域な被害となったことが特徴である。本グループでは，災害時の被災地における人間行動と経済活動に着目し，人的被害の要因，避難者の行動，避難所での対応と，産業被害について，現地ヒアリングとアンケート調査により実態を明らかにすることを目的とする。

3. 研究成果の概要

以下では，各グループの研究成果を報告する

3.1 気象グループ

台風 19 号における温暖化の影響評価を行った。ここでは，台風中心より東側を通過する日平均値の水蒸気フラックスを指標として，20km 解像度の d4PDF で発生した台風性低気圧と台風 19 号を比較した。解析データは 20km 解像度 d4PDF の現在気候（60 年×50 アンサンブル）と将来気候（60 年×90 アンサンブル）から抽出された台風の日平均水蒸気フラックス，そして気象庁 MSM データによる台風 19 号が発生した 2019 年 10 月 10 日の日平均水蒸

気フラックスである。d4PDF から上記の抽出基準で抽出された台風の個数は現在気候で 4918, 将来気候で 8196 であった。高度は約 10000m まで、鉛直方向に全ての層で同じ定義で水蒸気フラックスを計算し、鉛直プロファイルを作成した。得られた結果を図 1 に示す。横軸が水蒸気フラックス、縦軸が高度を示す。赤（青）の陰影は d4PDF の将来気候（現在気候）から抽出された台風の水蒸気フラックスの相対頻度を表しており、陰影の色が濃いほど相対頻度が高い（その水蒸気フラックス量を持つ台風の頻度が多い）ことを示す。赤及び青の実線で水蒸気フラックスの最大値（相対頻度 0）のプロファイル、破線で相対頻度 0.001 のプロファイル、そして点線で相対頻度 0.01 のプロファイルを示している。そして、台風 19 号の水蒸気フラックス鉛直プロファイルを黒点でプロットしている。

台風 19 号の結果（黒点で表示）を見ると、5000m 以上の上空を除くほぼ全ての層で青色の実線の外側にプロットされている。このことは、d4PDF という大量アンサンブルデータの解析でも、現在気候では発生し得ないレベルの水蒸気量が台風 19 号によって日本列島付近に供給されていたことが示唆される。また地表面付近だけでなく、高度 10000m 付近までのほぼ全層で最大レベルあるいはそれ以上の水蒸気量がもたらされていた。すなわち、台風によってもたらされた水蒸気量の観点からすると、台風 19 号は現在気候ではほぼ有り得ないレベルの台風であったと言える。一方将来気候においては、台風 19 号の水蒸気フラックスは全層において相対頻度 0.01 以上の場所に位置している。こちらも頻度としては決して高くはなく稀なレベルの水蒸気量ではあるものの、将来気候では東日本付近に発生する台風の中で 100 回に 1 回以上は同程度の水蒸気フラックスを持つ台風が発生し得るということを示唆している。

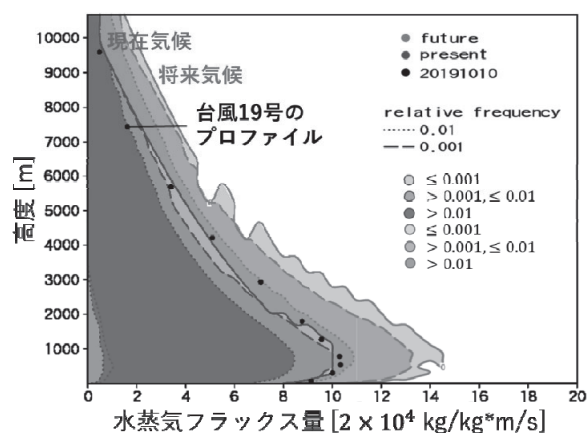


図 1 d4PDF で発生した台風と台風 19 号の水蒸気フラックスの鉛直プロファイル

台風 19 号の降雨帯を対象として、光学式ディストロメータと X バンド偏波レーダ（EBN レーダ）を用いた雨滴粒径分布の特徴を解析し、降水機構を考察した。図 2 に EBN レーダによって観測された 15:04 JST のレーダ反射強度 (Z_H) の RHI (Range Height Indicator) を示す。これより、層状性降水の特性であるブライトバンドが高度 5 km 付近に見られる。一方、高度 3 km より下層では 40 dBZ を超える強いセル状エコーが並んでおり、 Z_H が下層で増大している。高度 6.2 km より上空ではプレート状の氷晶結晶が卓越し、また高度 4.5 km から 6.2 km では、水と氷の混相であることを示した。降水強度が 10 mm h^{-1} よりも大きいとき、高度 3 km 付近で雨滴粒径分布の切片パラメータが急激に増加するとともに、その下層で雨滴の体積中央直径が増加していることが分かった。このことは、台風の降雨帯において、上層から落ちてきた雨滴が、下層で発達した浅い対流雲の中で雲粒捕捉成長するとともに、多数の小さな雨滴が供給されて、降水が強まったことを示唆している。この現象は、一般に「シーダ・フィード相互作用」と呼ばれており、通常は山地で発生する豪雨の原因となる。ところが今次災害では、平地においてもシーダ・フィード相互作用が起これ、それが広範囲の大雨につながった。つまり、過去の台風災害では主に山地で起こっていた豪雨発生機構が、今回は平地で働いたことになる。

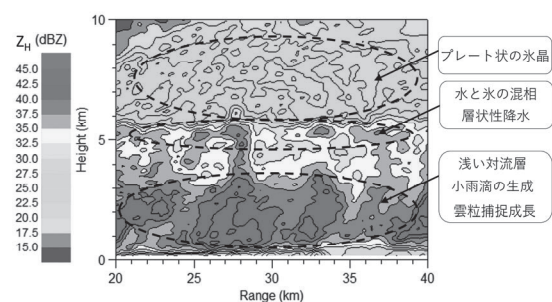


図 2 15:04 JST におけるレーダ反射強度 (Z_H) の RHI と、偏波パラメータから推定された降水過程

3.2 水文グループ

栃木県の中小河川（渡良瀬川支流の秋山川、永野川、黒川、思川など）と阿武隈川上流域の堤防および氾濫調査を実施し、中小河川の被災形態と被害が発生した河川の降水量、河川流量との関連を分析した。図 3 は、流出解析によって推定されたピーク流出高（＝ピーク流量／集水面積、単位： mm/h ）と当該箇所の集水面積（単位： km^2 ）を示している。赤点で示した地点は、山地からの流出河川に分類されるもので、栃木県の堤防決壊箇所に着目した結果である。

また荒川上流の越辺川で破堤した箇所における推定流量と集水面積との関係を参考にプロットした。青点で示した地点は、同じく栃木県の中小河川における堤防決壊箇所を示すが、平野から流出する河川の結果を青点でプロットした。これより、集水面積が200 km²以下程度の中小河川に着目すると、ピーク流出高がおおよそ35 mm/hを超えるあたりで被害が出ていること、支川の上流部では局所的にさらにピーク流出高が高くなって40 mm/hを上回る地点があることが分かる。同図に併記した秋山川と永野川の河川整備計画による計画流量（流出高に換算した結果）と比較すると、今回の洪水ではそれらの値をはるかに上回っていた。阿武隈川下流に流れ込む五福谷川のピーク流出高は約50 mm/hに迫る値となっており、山地における支川のピーク流出高がそのような値になるときは、斜面崩壊も同時に発生している可能性があり、土砂流出が河道を埋めて、水・土砂ともに氾濫するような水・土砂氾濫の発生が甚大な人的・家屋被害をもたらす可能性がある。

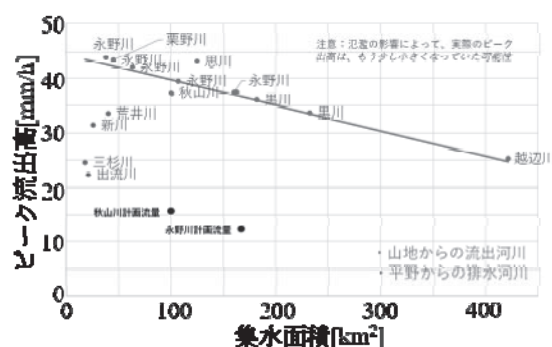
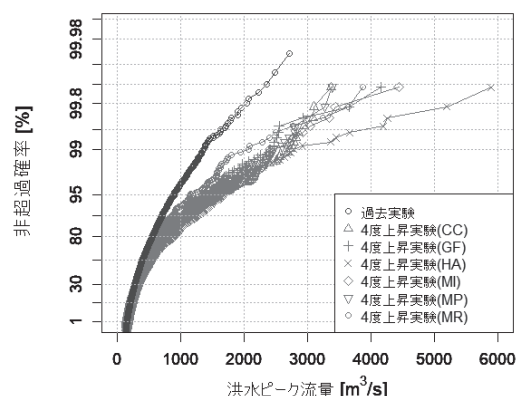


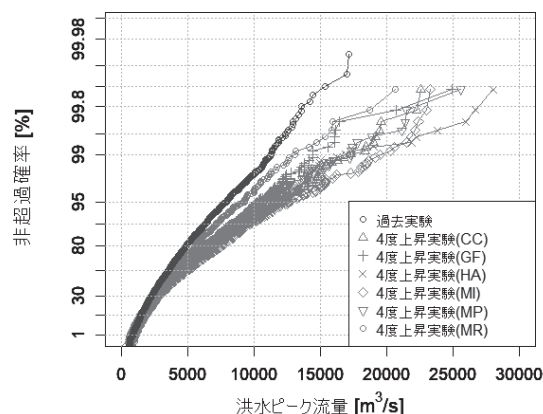
図3 栃木県管理河川の堤防決壊地点における集水面積と推定ピーク流出高の関係：赤印は山地からの流出河川を、青印は上流部に山地流域が無い河川を表す。参考として秋山川および永野川の計画流量を流出高に換算した結果を黒印で示す。

鳴瀬川、阿武隈川について、過去実験および4度上昇実験の年最大洪水ピーク流量と非超過確率をそれぞれ図4に示す。非超過確率の推定には、すべてWeibull公式を用いた。図中の赤線のマークの違いは、4度上昇実験で与えている海水面温度分布アンサンブルの違いを表し、凡例中の表記は予測に使用された海水面温度の将来変化パターンの頭文字を意味する。どちらの水系も、4度上昇実験では洪水ピーク流量が大きく増加することがわかる。台風19号の洪水ピーク流量の計算値は鳴瀬川（三本木橋地点）で2,058 m³/s、阿武隈川（岩沼地点）で11,467 m³/sであり、過去実験によると再現期間はそれぞれ535年、123年に相当する。阿武隈川では、台風19号の観測流

量に見られたように、上流の氾濫の影響で実際の流量は計算値よりも小さいと考えられるが、上流域を含めた流域全体として約120年程度の再現期間に対応する規模の洪水であったといえる。4度上昇気候下では、同計算流量の再現期間が6つの海水面アンサンブルに対して、鳴瀬川および阿武隈川でそれぞれ約32年～100年、約16年～58年と推定された。このように、4度上昇気候シナリオの下では高頻度化することが明らかとなった。



(a) 鳴瀬川（三本木橋地点）



(b) 阿武隈川（岩沼地点）

図4 d4PDF の洪水ピーク流量の非超過確率（青：過去実験，赤：4度上昇実験）

3.3 河川グループ

台風19号に起因する豪雨により、千曲川では大規模出水となり、河道内では流路が大きく変動した。特に、上田市においては、流路変動によって堤防が侵食を受け、上田電鉄鉄道橋（KP104 付近）が落橋するに至った。平面二次元河床変動シミュレーション結果に基づいて、砂州と流れの時間変化から堤防欠損との関連を考察する。従来交互に形成されていた砂州が、洪水流と土砂移動によってピーク流量時点で下流側に移動をしていた。この砂州の移動と流

路変動、並びに河岸侵食の関係についてより詳細に検討するために、図5に流れの変化と横断面における最深河床位置の変化を示す。図5aに示すように、ピーク流量時点では、流れは流路幅全体に直線的に流れ、最深河床位置も洪水前に形成されている滞筋に沿っている。この時点では、堤防欠損地点から見ると主流路は河川の中央部に位置している。一方、流量の低下に伴い流線は大きく蛇行しはじめ、最深河床位置が下流に移動しつつ、堤防に近づいていく様子がわかる(図5b, c)。この時、川幅全体にわたって大規模な砂州が発達することにより、流れの蛇行と集中を誘発し、河岸を侵食したと考えられる。

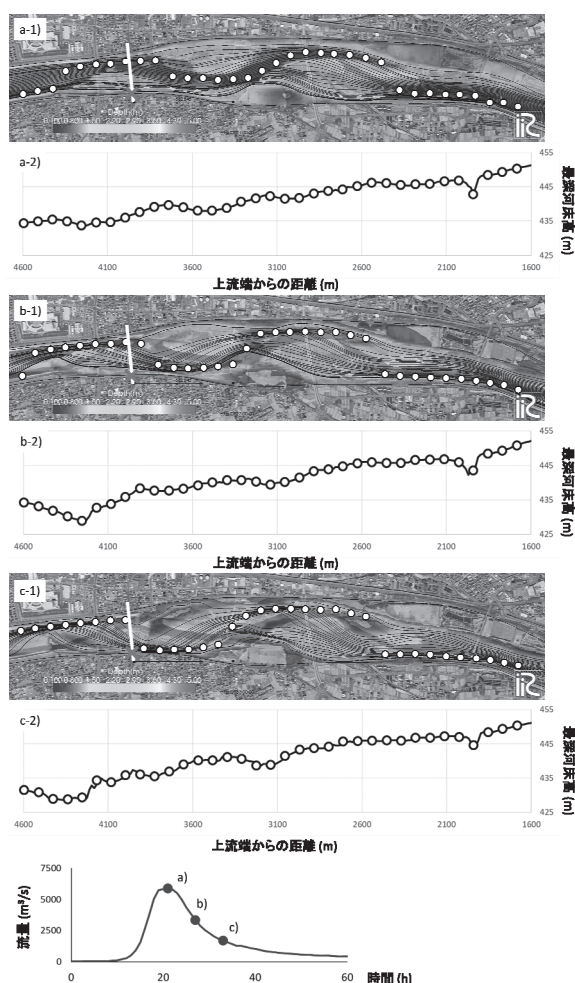


図5 流れと横断面内における最深河床位置の時間変化。流れ場は、水深コンターと流線により可視化している。また、a-1)、b-1)、c-1)における○は横断面内における最深河床の位置を表しており、a-2)、b-2)、c-2)はその縦断面図を示している。図中の×は落橋地点を示している。

千曲川における砂州は、長年固定化され、植生が密生していたものも多く、河道はいわゆる二極化状態にあった。しかし、ひとたび大規模出水が発生す

れば、急流河川特有の激しい侵食力により砂州や流路が大きく変動し、堤防侵食や落橋といったリスクを引き起こすことが本検討で改めて示された。

久慈川における二線堤の決壊状況を図6(a)に示す。左岸の堤内地を流下してきた氾濫流は二線堤で堰き止められ、水位が上昇し、その後、氾濫流が天端を越水する過程でE点(河口から22.5km)の二線堤を浸食し破堤に至ったと考えられる。SNSで情報提供いただいた10月13日8時頃に撮影された映像を確認した。二線堤の上流側では国道が冠水しているが、下流側では道路のガードレールが見えるなど道路は冠水していないことが確認できる。このことから氾濫流が二線堤により堰上げられていることがわかる。また、国道には陸閘が設置されているが、浸水時には閉じられていなかったことを聞き取り調査によって確認した。この映像が撮影された約1時間半後の9時39分の陸閘付近の様子を図6(b)(常陸太田市防災対策課提供)を示す。二線堤付近の水位が下がり、国道の陸閘を氾濫流が流れている様子がわかり、この時点では二線堤上流側の国道はまだ冠水している状況も確認できる。これらの知見は、今後の流域治水を進めていく上で貴重なものである。



図6 久慈川・二線堤の決壊状況

3.4 建築グループ

家屋被害状況を、大規模氾濫が発生した千曲川破堤箇所付近(57.5k 左岸の穂保地区)において調査した。以下に示す住宅は、図7中の番号に示すように、いずれも決壊地点近傍に位置する。図8(a)の2階建て木造在来軸組構法住宅(図7住宅③)は流出していないが、急流により1階の壁は流され、柱のみを残した結果、流れが中を通り抜けられるようになり、作用力が減って残存したと考えられる。柱が基礎に緊結され、柱と梁が比較的剛に接合されてい

たことも、流出と倒壊をまぬがれた要因と考えられる。しかしながら、建物基礎周囲は洗堀され、柱が西側に 2/100 程度傾いているが計測された。



図7 長野県長野市穂保、千曲川破堤箇所近傍の空中写真 (GoogleMap) (赤い丸：流出住宅，オレンジ丸：大破住宅)

住宅④～⑥は、住宅③より破堤点から遠くに位置するがともに流出した (図8(b))。Google Map Street View から④の商店の築年数が古く、水平耐力も低かったと推測される。④の商店は図8(b)右側手前に写る基礎を残し、北西方向に直線的に流され、住宅に衝突して止まったようである。⑤の住宅は、上部構造が基礎にしっかり緊結されていたためか土台が基礎上に残っている。また、⑥の住宅は図8(b)に示す元位置からはるか後方 (西の方) 200m まで比較的無傷の状態で流されている。流出前後の位置を図7に示す。この住宅は、住宅基礎に一般的に設けられている基礎下換気孔 (床下と基礎の間の空間の湿気対策および換気用に設けられている) がないタイプの住宅と見られ、かつ、ベタ基礎 (住宅下面にコンクリートが敷設されている) であったため、気密性が高かった。住宅⑤などによって破堤直後の強い流体力から守られることで大きな破壊を免れた可能性も高い。このため、住宅⑥では、周囲の急激な浸水深の増加に比べて気密性ゆえに住宅内部への浸水が遅れ、水位の内外差によって大きな浮力が発生して流されたと考えられる。

図8(c)の住宅⑦は1階が完全なピロティとして駐車場として利用されていた2階建て鉄骨造住宅である。浸水を想定した建築的対処方法であったかは定かではないが、1階に壁がほとんどないため流体力を受け流すことができる構造となっている。しかしながら、図7の通り約20m西に流され、駐車場屋根に衝突することで止まった (図8(c)参照)。



(a)大破した2階建木造住宅③



(b) 流出した住宅④，⑤，⑥



(c)住宅⑦ (大破して流出した2階建て鉄骨造住宅，1階はピロティ形式)

図8 家屋被害状況 (千曲川・破堤箇所周辺)

1階の柱が大きく変形し、大破している。1階のピロティ構造にかかわらず、崩壊にいたった要因として漂流物の蓄積によるダム化が想定される。⑦の住宅の北西隣に位置し、残存した2階建て木と鉄骨の混構造住宅 (梁に一部鉄骨が用いられている) 前面の堆積物から漂流物の多さが伺える。この住宅が残存した要因の一つとして、その東隣 (破堤点側) に位置した1階建て軽量鉄骨小屋に防護されたためであると考えられる。今後人命保護や財産保護を考慮して、内部浸水がしにくい気密性住宅が増えることが想定される。しかしながら、浮力により基礎の滑動

被害が生じ継続利用が困難となってしまう住宅が増えること予想される。

3.5 農業グループ

台風 19 号によるため池被害状況をみると、全国で 12 基の決壊が確認された。そのうち一基のため池を除いて大正期以前に構築された堤体で、経験的な技術によって築造されていた時代の構造様式となっている。一方でため池に関する指針が制定され、近代的な技術によって改修されたため池の決壊は確認されていない。決壊したため池は、堤高が 3m～6m 程度の小規模のもので、改修履歴もなく堤体、洪水吐、取水施設、安全施設の点検では、改修の緊急性は低いと総合判断されている。決壊に至った主要原因を特定することは困難であるが、堤体が全延長に亘って崩壊するのではなく、堤体の一部が V 字状に崩壊していることから（図 9）、底樋などが設置される箇所などの弱点部が起点となっていることが指摘できる。また、下流法面のすべりも認められることから、小規模の堤体であっても降雨浸透によって斜面崩壊が発生していることが確認される。また、越流による堤体崩壊を決定づける明確な情報は得られないが、洪水による貯水位急上昇によるパイピングの発生と下流斜面の崩壊の発生が複合的に発生した可能性が高い。



図 9 宮城県逆川上溜池の決壊状況（農林水産省提供）

3.6 地盤グループ

土砂災害が多発した宮城県丸森町の土砂災害発生状況を調べた。C-X合成レーダによって得られた土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化を図10に示す。降雨は、2019年10月12日午前9時ぐらいから10月13日午前2時ぐらいまで降り続いており、12日午後9時6分に最大降雨強度を記録している。近くに住んでいる住民によると、午後9時7分に土石流が発生したとのことであり、ちょうど最大降雨強度の発生

時間と一致している。土石流発生までの積算降水量は309mmであり、同じ花崗岩系の地質で発生した2018年の広島県安芸郡熊野町川角での土石流発生までの積算降水量153mmに比べると、土石流発生までの積算降水量が大きいことがわかる。これは、最大降雨強度と斜面勾配の両地点での違いが影響を与えていると考えられる。2018年の広島県安芸郡熊野町川角で土石流を発生させた豪雨の最大降雨強度は120mmを超えており、子安地区の1.5倍以上となっている。どちらの土石流も表層崩壊起源であることを考えると、斜面表層の土壌水分量の増加によって崩壊が発生していると考えられるため、短時間でも最大降雨強度が大きい方が表層における水分量が一時的に増えるため、積算降雨量が少なくても斜面崩壊が発生しやすい状態となると考えられる。また、広島県安芸郡熊野町川角の斜面勾配は約25度であり、子安地区の18度よりも斜面勾配が急であり、崩壊が発生しやすいと考えられる。

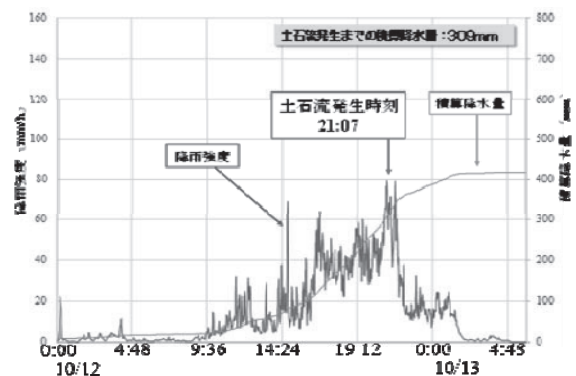


図 10 C-X 合成レーダによる土石流発生地点における降雨強度の時間的な変化

堤防被災状況の特徴を明らかにするために、直轄 3 河川（阿武隈川上流、鳴瀬川、吉田川）の堤防被害数を被害形態ごとに表 1 に示す。被害形態は決壊、裏法崩れ、漏水に分類され、決壊箇所は全て越水による裏法侵食が主原因である。被害形態の内、土質や土層構成等の地盤に関する要因が強く影響する法崩れと漏水については、発生率（1km あたりの発生箇所数）も示す。また、比較のために矢部川、鬼怒川および重信川の被災事例も併せて記載した。

法崩れに関しては、今回の 3 河川での発生率は 0.05～0.17 箇所/km の幅に入っている。鬼怒川や重信川とも大差は無い。3 河川の法崩れ箇所の内、崩壊が法肩近くにまで達する大きなものは阿武隈川上流左岸 17.4k と鳴瀬川左岸 40.7k、吉田川右岸 24.1k で確認した。堤体及び崩壊した堤体土の観察から、阿武隈川と鳴瀬川の被災箇所では、堤体内水位は裏法面中ほどでは堤体底面から 1m 程度上昇した痕跡

表 1 被害形態ごとの発生件数と発生率
(各被害数は箇所数, 漏水は基盤漏水と堤体漏水の合算)

	決壊	法崩れ	漏水	被害範囲	法崩れ率 (箇所/km)	漏水率 (箇所/km)
阿武隈川上流	1	10	11	103.4K (5.4~108.8K)	0.05	0.11
鳴瀬川	0	9	0	40.3K (0.4~40.7K)	0.12	0
吉田川	1	14	1	29.7K (1.6~31.3K)	0.17	0.03
鬼怒川(2015)	1	7	23	34.0K (7.9~41.9K)	0.10	0.34
重信川(2017)	0	1	28	4.9K (1.1~6.0K)	0.10	5.71
矢部川(2012)	1	5	17	12.4K (5.0~17.4K)	0.20	0.68

※発生率の算定にあたって, 被害範囲は漏水あるいは法崩れが生じた最上流箇所から最下流箇所までの距離とした。吉田川では被害範囲に占める越流区間長および水位が HWL を上回った区間長が 8 割以上, 阿武隈川では約 3 割, 鳴瀬川ではほぼゼロである。鬼怒川(2015)では約 7 割, 重信川(2017)では HWL を超えた区間はなく, 矢部川(2012)ではほぼ全区間で HWL を超過した,

(外水位) しか見られず, 法面からの雨水の浸透により表層が滑り破壊を生じたものと考えられる。したがって, もしも洪水がさらに長時間継続したとしても堤体内水位が大幅に上昇しなければ崩壊領域がさらに拡大し天端まで崩壊することは無かったものと考えられる。今回の出水による裏法崩れは, 何れも堤防の治水機能を損なうようなものではなかった。

次に漏水に関しては, 3 河川では全体的に今回の出水による漏水率が低かった。漏水率がゼロの鳴瀬川は, 外水位が低く高水継続時間が短かったこと, さらに基礎地盤には透水性の高いレキ層はなく地表には粘土層が広く分布していることがその理由として考えられる。同じ地域を流れ, 基礎地盤の特性としては鳴瀬川と比較的類似している吉田川では, 大半の区間で HWL 以上の外水位となったにも関わらず僅か 1 カ所, 漏水率は 0.03 箇所/km になった。吉田川については, 大半の区間で HWL 以上の外力が作用したにも関わらずほとんど漏水が発生せず, 漏水に対する安全性が確認されたものと言える。阿武隈川上流の漏水は 11 カ所に上っているが, 漏水率は 0.11 箇所/km と低い。漏水率は, 基礎地盤や堤体の土質や土層構成によって大きく変わる。基礎地盤および堤体が砂やレキで構成されている重信川では HWL を超える区間が無かったにもかかわらず漏水箇所が多く, 漏水率が 1km あたり 5 か所以上と極端に大きい。鬼怒川では漏水被害のあった区間での水位は HWL 前後 (およそ ±1m) と高く, 漏水率は 0.34 箇所/km と高い。また, 矢部川では全川にわたって HWL を超え (越水区間は無かった), 漏水率は 0.68 箇所/km と高かった。

3.7 高潮・高波グループ

台風 19 号の海岸被災調査は, 発達したうねりによる海岸の被災が広範囲に及んだため, 御前崎から犬吠埼までの長い海岸線を対象として実施された。台風来襲直後からの複数チームによる調査によって, 図 11 に示すような痕跡高さの分布が得られた。台風 19 号では広範囲の海岸で高潮による水位上昇があったものの, 潮位観測記録から東京湾内を除いて痕跡高に占める寄与は 1.0 m 未満であり, 計測された高さは主に高波浪の遡上によるものである。特に高い遡上高が見られたのは台風進路に近い相模湾・駿河湾沿いの海岸であり, 広い範囲で 5 m (T.P. 上) を越える遡上高が計測された。太平洋に開いた両湾では湾軸に沿って深い海谷が存在し, 外洋からのうねりは減衰することなく湾内へと伝わり, 湾奥の西湘海岸や富士海岸で大きな遡上を生じた。

特に大きな遡上高が計測されたのは相模湾奥の西湘海岸であり, 大磯漁港の西側の海岸では波浪による遡上が最大で 13 m (T.P. 上) に達していた。遡上波によって海岸沿いを走る西湘バイパスでは, 盛土区間の海側斜面に侵食が生じ, 海側の高速道路施設も越波被害を受けた。西湘バイパスは, 2007 年の台風 9 号 (FITOW) や 2017 年の台風 21 号 (LAN) でも大規模に被災しており, 海岸での長周期波 (数十秒～数分程度の周期をもつ波) の発達が被災に関与していることが指摘されている。このような長周期波は, 台風によって直接的に生成されるものではなく, 浅海域で周期の異なる波浪成分の相互干渉によって生成され, 通常の海岸では反射によって沖へと伝わるのが知

られている。沖合に急峻な海底斜面を有する西湘海岸では、沖に向かう長周期波が急斜面で屈折・再反射することで海岸に捕捉されて増幅する傾向がある。台風19号においても、西湘海岸での波浪観測データ（国土交通省による）には著大な長周期成分が記録されており、こうした複雑な地形上での波浪発達過程が大遡上に関与したものと推測された。相模湾奥部の痕跡高は西湘海岸から東側の湘南海岸にかけて急減しており、著大なうねりを減衰させる浅い陸棚が東に向かって拡大することに帰すると考えられる。湘南海岸においては、各地の海水浴場で後浜にまで遡上が達しており、砂浜背後の国道まで浸水している場所もあった。稲村ヶ崎付近の海岸では国道が護岸の吸出しによって沈下し、台風直後の地域交通に大きな影響を与えた。さらに東側の三浦半島の相模湾に面した海岸も高波浪による影響を受けたが、顕著な被害は確認されなかった。

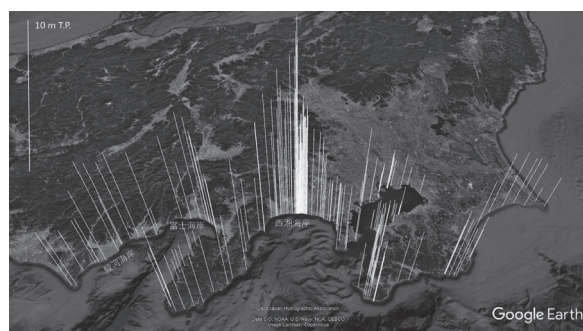


図11 2019年台風19号による御前崎～犬吠埼間の海岸での水位痕跡高の分布（左上のバーが10 m T.P.の高さに相当、データはShimozonoら（2020）に基づく。

台風来襲時に国土交通省により設置されていた波高計と流速計をもとに、台風ピーク時前後の波浪成分を分析した（水深6～20 m地点、図12）。台風15号では水深13 m地点（P3）で波高約5 m、台風19号では8 mを越える有義波高が確認された。また、主に波群の拘束波として発達したと考えられる長周期成分（ <0.04 Hz）の波高は台風15号で1 m、19号で2 m程度と観測された。これら長周期波の伝播過程をより詳細に把握するため、ほぼ同一水深の三点（P1a, P2a, P3）で流速変動の得られた台風15号での観測結果を対象とし、水位変動と流速の長周期成分との関係を相互相関解析によって分析した。その結果、P3においては岸沖方向流速の長周期成分と水位変動の長周期成分との間に位相差を持った強い相関が存在し、観測された長周期波は主に岸沖方向の部分重複波を形成していることが示唆された。一方で、P1aでは水位変動と沿岸方向流速の間に位相差0

sの強い負の相関が台風ピーク時を中心に確認され、大磯海脚（Oiso Spur）西側では沿岸方向を西側に向かって伝播する成分の存在が示唆された。このことから、台風19号来襲時においても、急峻な地形の影響を受けて、浅海域で発達し、海岸で部分反射した長周期波が屈折によって沿岸方向に伝播していた可能性が示唆された。

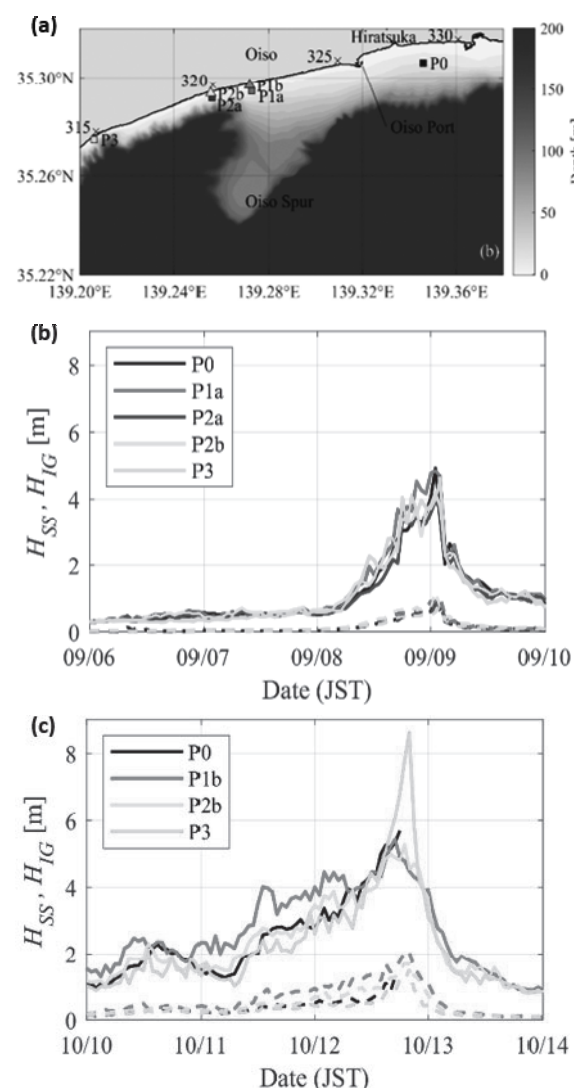


図12 風波波高（実線）および長周期波波高（破線）の観測値（観測位置(a)、台風15号(b)、台風19号(c)）

3.8 強風グループ

表2に2019年台風15号と台風19号の強風被害の特徴を比較して示す。台風19号は、上陸時の暴風・強風半径が台風15号の約3倍と広い範囲に影響を与えた可能性があるが、その影響は上陸後の中心気圧の上昇（勢力の衰退）により顕著なものとはならなかった。住家被害に関しても被害発生地域は、台風19号による影響は台風15号に比べて広い範囲にわ

たっており件数が多いが、その多くは豪雨による水害に起因するものであった。台風15号に比べ浸水被害件数割合が高いことなどからもそれが理解される。

表2 台風15号と19号の強風被害の特徴の比較

項目	台風15号	台風19号
上陸時の台風情報	中心気圧 955～960 hPa 暴風半径 110km, 強風半径 220 km	中心気圧 955～965 hPa 暴風半径 330km 強風半径 650 km
最大風速	神津島 43.4m/s 羽田 32.4m/s, 等	羽田 34.8m/s 神津島 30.7m/s (一部欠測), 等
住家被害	千葉県房総半島を中心に, 住家被害(全壊, 半壊, 一部損壊合計) 40,304 棟 *) 床上, 床下浸水合計 207 棟*) 浸水件数割合 =0.5% =207/(40304+207)	北海道から九州まで, 住家被害(全壊, 半壊, 一部損壊合計) 67,985 棟 *) 床上, 床下浸水合計 30,929 棟*) 浸水件数割合=35% =37056/(67985+37056)
その他の顕著な被害	千葉県君津市において送電鉄塔 2 基の倒壊, 千葉県を中心に電柱 1,996 本の倒壊・損傷 その他, 房総半島を中心に強風による被害多数	千葉県市原市において竜巻による被害発生 強風により建築物, 構造物の劣化等が顕在化した事例が散見された。

*)消防庁統計値は速報値で、住家被害と浸水被害の件数については、重複カウントしていないことを確認した。そこで、件数の差ではなく、被害件数割合で比較することとした。一方、内閣府被災度判定では、浸水深に応じ、住家被害は、全壊、半壊、一部損壊に振り分けられる。この件数は未公表である。

図13に台風19号に伴い千葉県市原市で発生した竜巻の被害状況を示す。同図Aで発生した運動場のネットフェンス支持コンクリート中の折損被害は、気象庁日本版改良藤田スケールでは、DI:(24) ネット(野球場・ゴルフ場等), DOD:(2) 支柱の倒壊(代表値 65m/s)と判断される。同図Cでは、木造住宅の被害が見られた。2階建て住宅で、屋根小屋組みが飛散している。DI:(1) 木造の住宅又は店舗, DOD:(7) 小屋組の構成部材の損壊又は飛散(代表値 65m/s)と判断される。住宅の敷地内に駐車されていた軽自動車は 60m 程度飛散していた。同図Dでは車両の飛散が見られた。飛散した車両は写真にある通常の乗用車のほかに、軽自動車、トラック等かなり多くの車種にわたって横転、飛散などの被害が発生した。同図Eでは志津公民館の開口部(窓ガラス, サッシ)に被害が見られた。同公民館の敷地内では、比較的直径の大きな樹木の根返りや、受電

設備(キュービクル)の鋼製収納が膨張するように外向きに変形する被害、受水槽の鋼製の蓋の飛散等、竜巻の吸引渦の影響によって考えられるような被害が見られた。

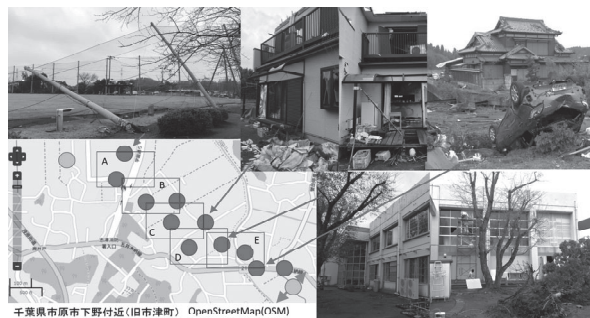


図13 千葉県市原市(下野付近)に発生した竜巻による主な被害

3.9 避難・経済被害グループ

今次台風による犠牲者(死者・行方不明者)の特徴を記述する。原因外力別の犠牲者数は(図14), 1999-2018年の風水害では「土砂」が相対的に多く46%(580人)で、「洪水」23%(285人), 「河川」19%(242人)の順となる。「洪水」, 「河川」は筆者(牛山)独自の分類で、「洪水」が河川からあふれた水に起因する犠牲者, 「河川」が増水した河川等に接近して転落などした犠牲者である。台風19号等では「洪水」が53%を占め, 「河川」と合わせると71%となる。近年の風水害と比べ、水関係犠牲者の比率がかなり高かったことが台風19号等の特徴である。

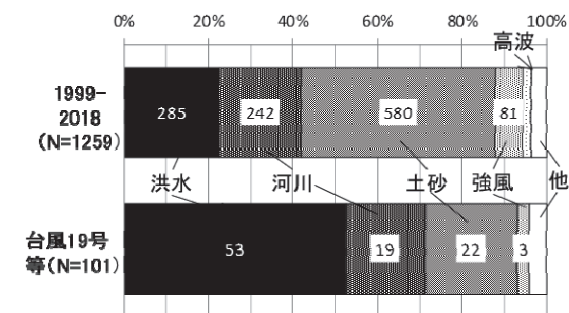


図14 原因外力別の犠牲者数

「洪水」・「河川」犠牲者について、発生位置を推定できたものを対象に洪水等の危険箇所との関係を検討した。ここでは国土交通省「重ねるハザードマップ」を元に、その場所が浸水想定区域(計画規模)または浸水想定区域(想定最大)の「範囲内」かどうかを検討した(図15)。なお被害が多かった福島県いわき市は「重ねるハザードマップ」では浸水想定区域がないが、公表されている市発行のハザードマップを参照した。1999-2018では「範囲内」「範囲近傍」の合計が43%にとどまり, 「土砂」犠牲者とは

傾向が異なる。これは、土砂災害危険箇所等は、地形情報を元に全国的に整備されているのに対し、浸水想定区域は河川単位で整備され、中小河川は整備が進んでいない事の影響が考えられる。台風19号等では、「範囲内」「範囲近傍」の犠牲者が68%と比較的多かったが、それでも土砂災害の一般的な傾向と比べれば「範囲外」がやや多い。

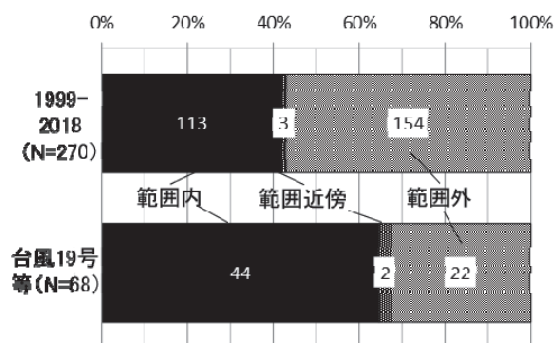


図15 浸水想定区域の範囲内外別の犠牲者数

操業能力の復旧に影響を与えた要因と各要因の平均的な影響日数を図16に示す。建物や設備の被害が復旧に大きな影響を与えているが、専門業者が不足していることも間接的にこうした施設の復旧に影響を及ぼしている。また、長期的にみれば、復旧資金自体が不足していることの影響も大きい。この問題に直面している事業所では操業水準は元のレベルに回復していないケースがほとんどである。ライフラインの中では、都市ガスの被害影響が最も長く続いており、上水道、交通インフラ、通信、停電の順に影響日数が長くなっている。なお、全事業所の被害額の比率は、建物復旧費用：22%、設備復旧費用：37%、在庫被害：10%、建物設備・除却費用：9%と、直接的な被害が大部分を占めるが、受注減少による損失：10%、受注分のキャンセルによる損失：9%、と売り上げに関わる損失も大きい。なお、直接被害と売上減少分は便宜的に合計しているが、被害総額の推計の為に固定費用等の考慮が必要となる。

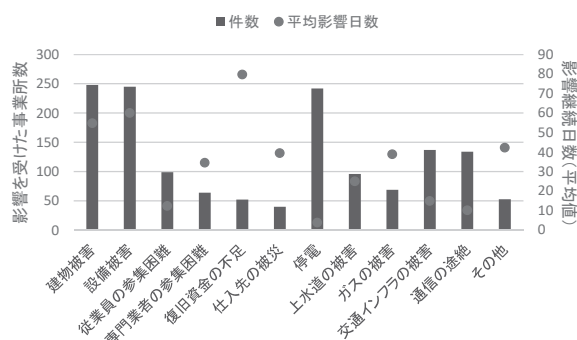


図16 操業能力の復旧に影響を与えた要因と各要因の影響日数

4. 研究成果の発信

得られた研究成果を広く社会一般に公表するために、成果報告会の開催を企画した。当初は、2020年3月26日開催を予定していたが、コロナウィルス感染防止のため、同年7月15日に延期した。開催方法も当初の対面から、WEB会議ツール「zoom」を用いたオンライン会議形式での開催となった。研究者や建設コンサルタント、行政機関、学生などから162名の参加があった。コロナ感染防止に配慮した形で、来たる台風シーズンの前に報告会をなんとか開催できた。また、研究成果を取りまとめた「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書を作成し、インターネット上で広く公表する予定である。

5. まとめと今後に向けた提言

本研究では、令和元(2019)年台風19号及び台風21号による広域災害の被害状況・メカニズムの全容を明らかにすることを目的とした調査・解析を行った。ここでは、気象、水文(降雨流出)、河川洪水氾濫、土砂災害、地盤、高潮・高波、強風、避難行動、経済被害の観点から、現地調査やデータ解析、各種数値シミュレーションを実施し、多角的に検討した。浸水面積が350km²以上、建物被害が10万棟以上発生し、これは平成30年7月豪雨(西日本豪雨)の約2倍と広範囲かつ甚大な洪水氾濫被害となった。また、台風による土砂災害発生件数も過去最多、沿岸部では強風(竜巻)、高波被害が発生した。

本研究の調査研究の成果に基づいて、各グループでは、今後に向けた提言を作成した。それらの提言を一覧できる形でまとめたものを表3に示す。ここでは、各グループの提言を、分野別(気象、洪水氾濫、土砂災害、高潮・高波、建築・農業他)に分類した。また、内容として、メカニズム解明、予測・リスク評価・技術開発、対策に分けた。対策については、ハード対策全般、流域対策、気候変動関連、ソフト対策、に細分化した。ハザードとしては、台風19号の災害の特徴を反映して、洪水氾濫に対する提言が最も多い。また、洪水氾濫の被害を受ける建築分野・農業分野からも提言が含まれている。内容については表3を参照されたい。

なお、本文中で示された全ての結果や図表に関しては、令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費研究「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」報告書から引用した。

表 3 今後に向けた提言

分野	気象	洪水氾濫 (全般)	洪水氾濫 (堤防、ため池)	土砂災害	高潮・高波/強風	建築・農業他
メカニズム説明	(気象)発生した気象現象のメカニズムに関する知見の体系化を図るべきである。	(地盤)よりリスクの高い地点の周知と越水・破堤による予測される災害現象を理解する必要がある。	(地盤)合流する支流の堤防の浸透による不安定化や氾濫の危険性の監視する必要がある。	(避難)土砂災害危険箇所の「範囲外」であっても、リスクは存在することを周知する必要がある。		(避難)浸水想定区域図だけでなく地形分類情報も有益である。地形分類情報を活用できる人材の育成が必要である。
	(水文)降雨パターンの変化による水害リスクの変化を認知する必要がある。		(地盤)現行の土砂災害対策に土砂洪水氾濫の要素を加え見直しながら運用する。			
予測・リスク評価・技術開発	(気象)観測事実の再現可能なモデル構築と予測技術向上により、ハザード予測を災害予測にまで利活用できる技術開発が継続して必要である。	(水文)アンサンブル予報による不確実性を含めた長時間洪水予測情報を提供する必要がある。 (河川)ハザードマップでは読み取れない浸水リスクを明示し、特に本川と支川の合流部の浸水リスクが高いことを周知する必要がある。	(地盤)堤防情報の在り方を検討し、研究・技術開発を継続するしくみづくりが必要である。 (地盤)想定すべき作用に対して堤防の発揮すべき性能を発揮できるように設計論を進展させるとともに、ねばり強さを発現させるような研究・技術開発に注力する必要がある。	(地盤)斜面崩壊の発生場・発生時・発生規模の予測と土石流の到達範囲予測を組み合わせた動的なハザードマップや、土砂・洪水氾濫のリスク評価に向けた流域からの土砂生産量の推定を高度化してゆく必要がある。	(高潮)海岸長周期波の発達・捕捉の予測技術開発と海岸保全・防災対策に反映する必要がある。 (強風)台風時のリアルタイムモニタリング技術の向上等を通じて、局所的な竜巻等の突風予測を実現し、防災に結びつけることが必要である。	(建築)住宅流出防止を目的とした浮力評価方法は検討すべき課題である。 (農業)長延長となる水利システムの機能と危険度を適正に評価し、洪水予測に基づく事前対策の実施が必要である。
		(河川)最新の計測技術を有効活用して、中小河川管理に不可欠な基礎データ整備を効率的に促進する。			(強風)海岸付近の地表面の空気力学的抵抗が小さい地域では、慎重な設計風速の評価が必要である。	(避難)水害広域化や少子高齢化による復旧資源減少を踏まえ、浸水を前提とした産業早期復旧の備えが重要である。
		(地盤)ハザードマップ作成や洪水時の水位予測などにおいて、河床変動の影響の考慮すべきである。				
対策(全般)		(河川)台風19号の洪水規模と現況の河川治水体力を比較すると共に、河川整備計画を可及的速やかに達成することが不可欠である。	(農業)中山間地域のため池は、越流により簡単に破堤しない構造様式とし、そのための新技術を用いた改修基準を策定する必要がある。			(建築)建築的観点から求められる洪水対策について、技術的・費用対効果の観点から研究を積み重ねる必要がある。
		水文提言3:地形的な特徴を踏まえた中小河川の洪水対策が必要である。				
対策(流域)		(河川)堤防決壊や越流に伴う大規模氾濫が多いため、堤内地での氾濫流制御と共に、早急に河道に戻す工夫を行って、氾濫面積・時間を最小化する必要がある。			(避難)学校施設を避難所として活用するためには、施設の防災機能を上げるだけでなく、学校機能を早期に回復させるための計画も検討しておく必要がある。	
		(河川)浸水被害が頻発した支川合流部の水害リスクを認知し、土地利用規制・誘導を含む流域対策を積極的に進めることが必須である。				
		(水文)河道では流しきれない氾濫流の制御方法を、流域全体で都市計画、地域計画と一体として考える必要がある。				
気候変動	(気象)温暖化の影響が出だし、後悔しない適応が重要である。科学的予測を元にした適応計画を構築し今すぐ実行することが重要である。			(地盤)気候変動に伴う土砂輸送増加量を定量化するため、素因・誘因を用いた評価技術の開発が必要である。	(高潮)気候変動に伴う海岸外力の増大並びに、それに対する防護施設の強靱化・漂流物対策の検討を進めることが必要である。	
ソフト対策		(地盤)土石流発生が予測される地点に対して土石流の数値シミュレーション等を実施し、避難方法決定に役立てる。 (避難)立ち退き避難が必要な人に、避難行動をとってもらうためには地域や離れた場所まで暮らす家族とのコミュニケーションが求められる。				(建築)浸水想定区域住民のための住宅仕様選定・住宅清掃・補修マニュアルを整備する。

謝 辞

本稿は、令和元年度科学研究費助成事業・特別研究促進費「令和元年台風19号及び台風21号による広域災害に関する総合研究」（研究代表者：二瓶泰雄，課題番号：19K24678）の助成を受けて、今次台風により災害発生メカニズム把握や人的・物的被害の解明のための調査研究を総合的に実施し、取りまとめました。調査に際しては、土木学会，日本気象学会，日本建築学会，地盤工学会などに所属する研究者・技術者・学生に多くの協力を得ました。また，現地調査実施や関連データの提供に対して，国土交通省関東・北陸・東北地方整備局，農林水産省，長野県，宮城県，福島県，栃木県，千葉県，神奈川県，仙台市などの関係機関，被災地の住民の皆さんにご協力いただきました。メソアンサンブル数値予報モデルGPVの降水予測情報は気象庁予報部より提供いただきました。また，文部科学省による複数の学術研究プログラム（「創生」，「統合」，SI-CAT，DIAS）間連携および地球シミュレータにより作成されたd4PDFを使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 気象庁（2020）：令和元年に顕著な災害をもたらした台風の名称について，https://www.jma.go.jp/jma/press/2002/19a/20200219_typhoonname.html（閲覧日：令和2年4月17日）。
- 国土交通省（2019）：台風第19号による被害及び今後の対応策，https://www.zenken.com/kensyuu/kousyuukai/H31/660/660_morikubo.pdf（閲覧日：令和2年8月11日）。
- 国土交通省（2020）：堤防決壊箇所一覧（4月8日12:00時点），https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html（閲覧日：令和2年4月12日）。
- Shimozono, T., Y. Tajima, K. Kumagai, T. Arikawa, Y. Oda, Y. Shigihara, N. Mori(2020): Coastal impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka areas, Japan., *Coastal Engineering Journal*, Vol.62, No.2, pp.129-145.

2019年8月の秋雨前線に伴う豪雨の特徴と 佐賀県で発生した洪水災害の概要

山本 晴彦

山口大学大学院創成科学研究科

要 旨

2019年8月27日未明から秋雨前線の活動が活発になり、28日までの2日間の積算降水量は背振山地で600mmを超え、佐賀県西部の六角川上流の武雄では28日早朝までの24時間降水量が400mm近くに達した。この結果、六角川の水位が上昇し、堤防の決壊や越水を防ぐためにポンプを止める「運転調整」を余儀なくされ、堤防内の市街地に溜まった雨水が排水できずに内水氾濫、支流の高橋川では外水氾濫が発生した。また、住家が密集した佐賀市の市街地では内水氾濫が発生するなど、県内の住家被害は6,060棟にも及んだ。

1. はじめに

2019年8月26日朝には九州南部付近にあった秋雨前線は、27日には対馬海峡付近まで北上し、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、九州北部地方では大気の状態が非常に不安定となった。このため、26日から30日にかけて、佐賀県、福岡県、長崎県では記録的な大雨となった（福岡管区气象台、2019）。ここでは、佐賀県で2019年8月27～28日にかけて発生した秋雨前線豪雨の特徴、豪雨に伴い発生した洪水災害の調査結果等の概要について報告する。

2. 秋雨前線に伴う豪雨の特徴

図1には2019年8月28日6時の地上天気図（気象庁、2019a）と28日3～4時の解析雨量（気象庁、2019b）を示した。26日に九州南部に位置していた秋雨前線は、太平洋高気圧の強まりにより27日には対馬海峡付近まで北上した。28日には日本海の秋雨前線上に低気圧が発生し、東シナ海から九州地方を通り低気圧への暖かい気流の流入が強まった。これにより、秋雨前線から南に約100km離れた長崎県北部から佐賀県・福岡県の有明海沿岸、熊本県北部に至る地域では、南北の気温差が大きくなり（28日3時：佐賀23.8℃、長崎27.5℃）、局地的な前線が形成された。この前線付近では強い上昇気流により積乱雲が継続的に発生し、線状降水帯が形成されて停滞することにより、28日の未明から早朝にかけて豪雨が継続した（ウェザーニューズ、2019）。

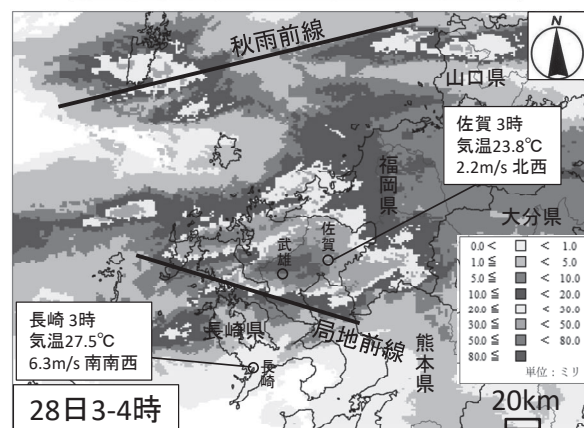
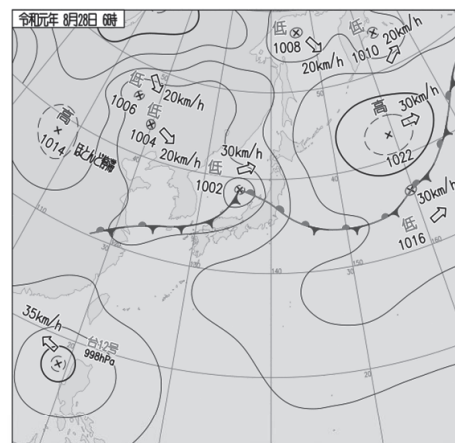


図1 2019年8月28日6時の地上天気図(気象庁、2019a)と8月28日3～4時の解析雨量(気象庁、2019b)(秋雨前線と局地前線等を著者が加筆)

佐賀県における豪雨の空間的特徴を見るため、8月27日～28日の2日間の積算降水量の分布図を図2に示した。積算降水量は背振山地で600mmを超え、それを囲む東西約40kmの帯状の地域で500mmを観測し、平戸地方でも同様の降水を記録している。今回の豪雨では、六角川流域の武雄市、大町町、江北町、白石町等、牛津川流域の多久市、小城市等で外水・内水氾濫、佐賀市でも内水氾濫が発生し、多くの住家に浸水被害が生じており、短期間で河川流域に大量に降った降水により洪水被害が発生した。

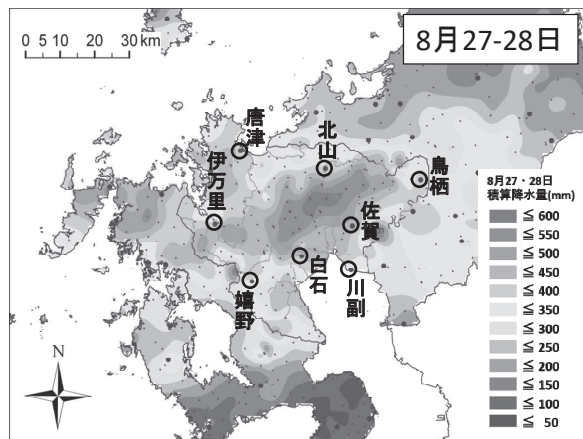


図2 積算降水量(8月27日～28日)の分布図(mm, ○は佐賀県内のアメダス地点)

2019年8月の秋雨前線豪雨における佐賀県の降水の概要を表1に示した。内水氾濫に見舞われた佐賀アメダスでは28日に283.0mmの豪雨を観測し、最大24時間降水量も390.0mmと観測史上第2位(1890年8月観測開始, 1976年からの統計では第1位)を記録する記録的な集中豪雨に見舞われた。白石アメダスでは佐賀を上回る日降水量299.5mm(観測史上第3位)を観測し、最大24時間降水量も371.0mmと記録的な大雨となった。また、最大1時間降水量は佐賀で110.0mm、白石で109.5mmを観測し、記録的短時間大雨情報も発令された。これ以外のアメダスでは観測史上第1位の記録を観測した地点も見受けられるが、統計開始年が2003年(川副), 2010年(唐津, 鳥栖, 北山)と短期間であることを考慮する必要がある。国土交通省や佐賀県が所管する雨量観測所では、六角川水系の小城で最大48時間降水量が561mmと本豪雨での観測記録の最大値を示し、アメダスの観測値を大きく上回っている。さらに、500mmを超える観測所が岸川(534mm), 南溪(527mm), 嘉瀬川水系では名尾(552mm), 祇園(526mm)の計5か所に及んでおり、洪水災害が甚大であった武雄(433mm, 432.0mm), 大町(417.5mm)よりも六角川水系の牛津川や嘉瀬川水系での降水が多かったことがわかる。

表1 2019年8月の秋雨前線豪雨における佐賀県の降水の概要

気象庁 (佐賀地方気象台)	日降水量 (mm)				積算 降水量 ¹⁾	最大1時間 降水量 ²⁾	最大10時間 降水量	最大3時間 降水量	最大24時間 降水量	最大48時間 降水量	統計 開始年
	26日	27日	28日	29日	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
唐津	95.5	165.5 ⁷	216.5 ¹	55.5	533.0	49.0 ⁷	17.0	93.5	280.5	494.0 ¹	2010年
北山	56.0	208.5 ³	154.0	21.5	440.0	42.5	15.5	89.0	324.0	364.0	2010年
鳥栖	71.5	189.0 ⁵	181.5 ⁶	35.5	477.5	57.0 ⁵	17.0 ⁷	97.0	343.0 ¹	371.0	2010年
伊万里	17.5	253.0 ⁵	127.5	21.5	419.5	59.0	18.0 ⁴	129.0	327.5	382.5	1976年
佐賀	31.5	143.5	283.0 ⁴	26.5	484.5	110.0 ¹	20.5	223.5	390.0 ¹	430.5 ¹	1976年
嬉野	4.0	141.0	191.5	1.0	337.5	56.5	18.5 ²	125.0	285.5	333.0	1977年
白石	10.5	102.5	299.5 ³	1.5	414.0	109.5 ¹	22.0 ¹	245.0	371.0 ¹	402.5 ¹	1976年
川副	14.0	112.0	182.5 ⁴	12.0	320.5	48.0	17.0 ¹⁰	111.5	264.5	297.5	2003年
国土交通省 ・佐賀県	日降水量 (mm)				積算 降水量 ¹⁾	最大1時間 降水量 ⁴⁾	最大3時間 降水量 ⁴⁾	最大24時間 降水量 ⁴⁾	最大48時間 降水量 ⁴⁾		
	26日	27日	28日	29日	積算値 ¹⁾	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
六角川水系											
岸川	37	301	230	10	578	89(53.5) ⁵⁾		143(132.5)	476(318.5)	534	
小城	41	278	278	25	622	90		180	508	561	
西多久	29	201	286	6	522	99(72)		190(162)	439(354)	494	
南溪	29	217	302	22	570	99		228	481	527	
河口堰	20	119	328	3	470	108		271	411	450	
武雄	7	148	284	4	443	85(62)		210(148)	398(347)	433	
白石	10	95	329	0	434	107		271	392	424	
矢筈	3	140	140	6	289	49 ⁶⁾		106 ⁶⁾ (153)	250 ⁶⁾	280 ⁶⁾	
嘉瀬川水系											
杉山	53	246	194	16	509	47		96	391	444	
嘉瀬川ダム	49	237	175	23	484	41		108	373	413	
宇渡	72	183	141	31	427	49		82	283	329	
古湯	43	300	191	30	564	60		143	444	495	
名尾	49	322	226	30	627	85		154	501	552	
祇園	35	273	249	21	578	88		141	479	526	
古場岳	67	195	140	34	436	49		77	287	341	
平松	61	266	166	45	538	50		127	392	436	
武雄市											
消防本部 ³⁾	3.5	148.5	283.5	3.5	439.0	89.0	23.0		397.5	432.0	
大町町											
大町町役場	16.5	134.5	283.0	1.0	435.0	93.5			381.0	417.5	

注1: 2019年8月26日～29日の積算値。

注2: 最大値は10分値で算出。佐賀の1890年8月からの統計では、「日降水量」は第4位、「最大24時間降水量」は第2位。

注3: 杵藤地区広域市町村圏組合消防本部。注4: 最大値は1時間値で算出。

注5: カッコ内の数字は1990年の洪水災害の際の観測値。注6: 6時と7時が欠測。

右上付きの数字は通年の順位。

3. 雨量と河川水位の特徴

図3には洪水災害が発生した佐賀県西部と周辺地域における雨量観測所（○：大文字はアメダス，下線はアメダス・消防署・町役場），水位・潮位観測所（△）の位置，図4には8月27日～28日の白石，大町，武雄の時間降水量・積算降水量と大浦の天文潮位，住之江橋・六角橋・新橋・潮見橋の水位（10分値）の推移を示した。有明海の西岸に位置する大浦潮位観測所では秋の大潮のために干満差が大きく，30日の大潮直前の28日7時に500cmを超える大潮を向かえている。今回の豪雨で甚大な洪水災害に見舞われた六角川では，上流の武雄（杵藤地区広域市町村圏組合消防本部）で27日未明から降り始めた雨が翌日28日4時35分に最大1時間降水量89.0mmを観測し，24時間降水量も400mm近くに達しており，中流の大町（大町町役場）でも4時に93.5mmの最大1時間降水量を観測するなど，ほぼ同様の降水を記録している。この集中豪雨により，武雄市内の潮見橋（河口から30.35km）では2時50分に1.13mであった六角川の水位が5時前には氾濫危険水位の3.10m，7時には4.12mと計画高水位の4mを越えている。

水位の上昇により六角川の堤防に設置された排水機場のポンプは稼働できず，堤防内の市街地に溜まった雨水が排水できずに滞留する内水氾濫が発生した。なお，潮見橋での既往の最高水位は1990年7月2日の豪雨の際に観測された4.85mで，この水位を約70cm下回ってはいたが，六角川に合流する高橋川ではバックウォーター現象により水位が上昇し，堤防からの越水により外水氾濫を引き起こした。中流の北方町の新橋（河口から24.10km）でも6時30分に最高水位7.29mを観測している。河口から11.30kmに位置する六角橋では，住之江橋（河口から3.80km）と同様に干満差が大きく，28日7時20分には5.97mの水位を観測しており，河口から10km以上の上流でも，海水の遡上により河川の水位に大きな干満差が生じていることがわかる。下流の白石でも7時までの24時間に371.0mmの降水を観測しており，六角川下流の住之江橋では，28日7時に5.34mの潮位を観測し，河川の水位が高い状態で豪雨が降り，樋門の閉鎖により排水が出来ない状況に陥り内水氾濫が拡大した。

4. 佐賀県における被害の特徴

表2には，2019年8月の秋雨前線豪雨による佐賀県内の人的被害と住家被害の概要（人的被害は令和元年12月27日8時30分現在。住家被害は令和2年3月11日8時30分現在）を示した（佐賀県，2020）。人的被害は死者3人，意識不明者1人となっており，死者3人はいずれも武雄市で亡くなっている。住家の全壊（外力（水流や泥流，瓦礫等の衝突等）が作用する

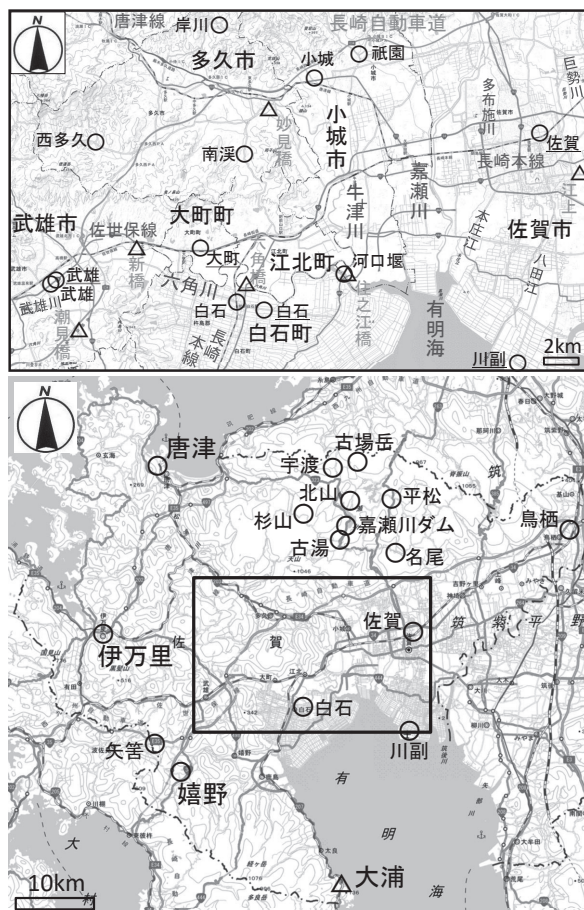


図3 洪水災害が発生した佐賀県西部（上）と周辺地域（下）における雨量観測所（○：大文字はアメダス，下線はアメダス・消防署・町役場），水位・潮位観測所（△）の位置

一定以上の損傷が発生している場合は，床上1.8m以上の浸水は「全壊」と判定）は87棟で，大町町が79棟（91%）を占めており，集中豪雨により六角川の水位が上昇し，樋門の閉鎖による排水不良により堤内地に雨水が滞留し，内水氾濫が発生した。また，佐賀鉄工所からの油の流出により，六角川への流出を防ぐために樋門等を閉鎖したことも，長時間にわたり雨水が滞留する要因の一つとなった。

大規模半壊は大町町で71棟，武雄市で34棟，半壊は武雄市で712棟と，六角川の氾濫により武雄市や大町町で甚大は被害が発生している。床上浸水は全体で773棟に達し，佐賀市が407棟（53%），武雄市が202棟（26%）を占め，半壊までには至らなく床上浸水と判定された住家が佐賀市で数多く認められた。床下浸水は4,310棟で，佐賀市が2,492棟と60%弱を占め，小城市560棟，白石町443棟，武雄市が332棟の順となっており，小城市と白石町で床下浸水の被害の発生が顕著であった。住家被害の総数は，佐賀市2,908棟（48%），武雄市1,296棟（21%），小城市643棟（11%），大町町303棟（5%），多久市200棟（3%）

の順であり、住家が密集した市街地で内水氾濫が発生した佐賀市、外水・内水氾濫が発生した武雄市での被害棟数が多いことがわかる。

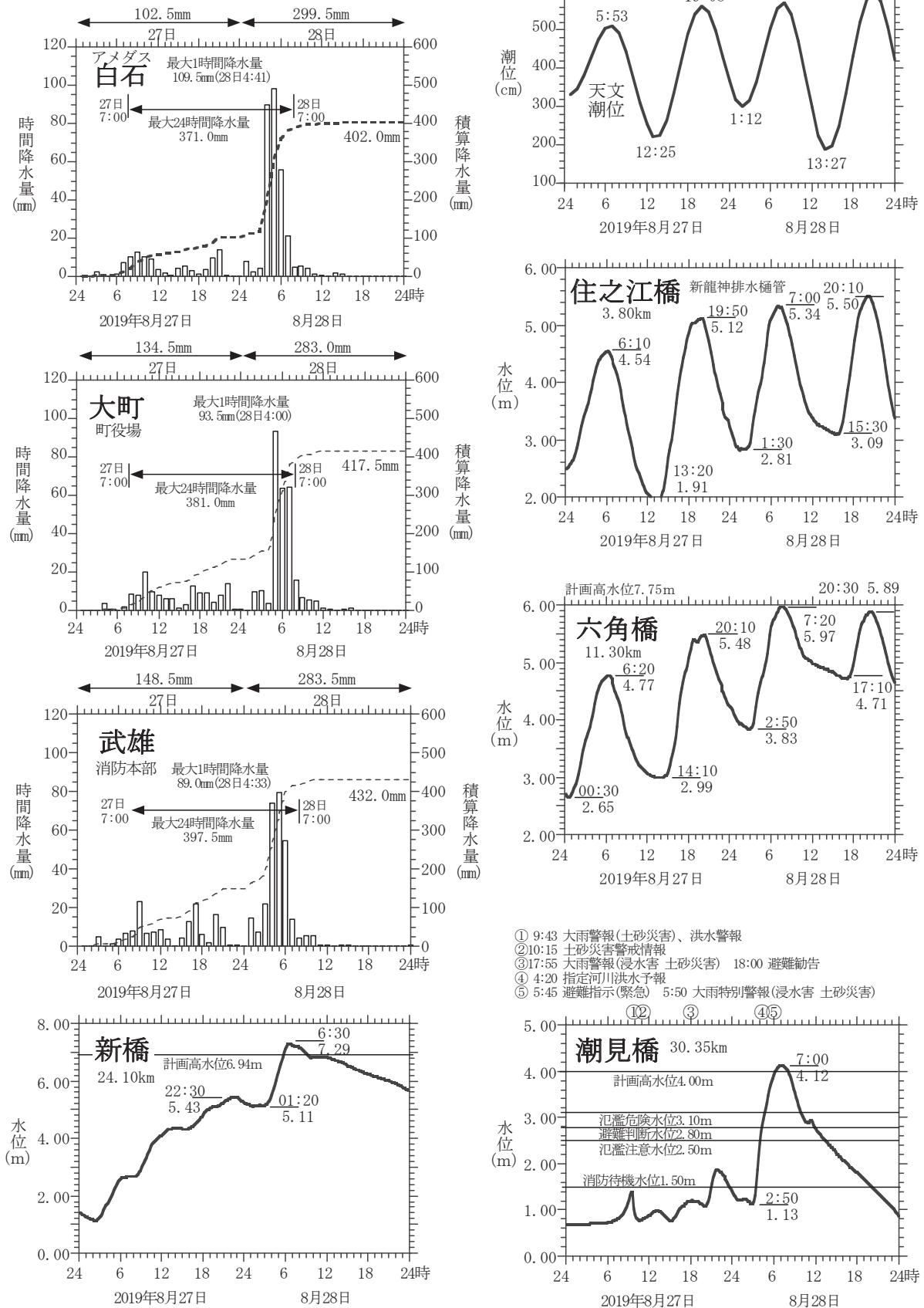


図4 8月27日～28日の白石、大町、武雄の時間降水量・積算降水量と大浦の天文潮位、住之江橋・六角橋・新橋・潮見橋の水位（10分値）の推移

表1 2019年8月豪雨による佐賀県内の人的被害と住家被害の状況（佐賀県、2019・2020）
（人的被害は令和元年12月27日8時30分現在。住家被害は令和2年3月11日8時30分現在）

	死者 (人)	意識不明 (人)	全壊 (棟)	大規模 半壊(棟)	半壊 (棟)	一部損壊 浸水以外(棟)	床上 浸水(棟)	床下 浸水(棟)	計	非住家 半壊以上(棟)
佐賀市		1	3		2	4	407	2,492	2,908	3
唐津市				1	3	2		23	29	
鳥栖市							1		1	
多久市				1	29	1	41	128	200	
伊万里市							2	24	26	
武雄市	3		2	34	712	14	202	332	1,296	272
小城市			2		8	3	70	560	643	1
嬉野市							2	9	11	
神埼市								1	1	
有田町							1		1	
大町町			79	71	4		18	131	303	
江北町					1		9	167	177	
白石町			1				20	443	464	3
合計	3	1	87	107	759	24	773	4,310	6,060	279

5. 六角川流域における地形の特徴と防災情報の発令状況

図5には、六角川と牛津川流域の治水地形分類図（上：国土地理院，2019）と六角川水系洪水浸水想定区域図（洪水ハザードマップ：計画規模）（下：国土交通省 九州地方整備局 武雄河川事務所，2016）を示した。治水地形分類図では六角川と牛津川流域は「氾濫平野」に分類され、旧河道も数多く認められ、幾度となく氾濫を繰り返して形成された地形の特徴を有している。また、六角川と牛津川の合流付近は「干拓地」であり、江戸時代からの新田開発により有明海を干拓して出来た低平地である。六角川水系洪水浸水想定区域図（計画規模）では、六角川流域は2.0m以上、牛津川の上流では5mを超える浸水被害が想定されており、豪雨時には事前の避難を始め、低平地が広がる地域では避難所への避難経路の確保も重要となっている。

図4の武雄市の潮見橋の水位図でも示したように、今回の豪雨では武雄地区（武雄市、大町町、江北町、白石町）に27日9時43分に大雨警報（土砂災害）、17時55分に大雨警報（浸水害、土砂災害）が発令され、翌28日5時50分には大雨特別警報（浸水害、土砂災害）が発令された。

また、武雄市には洪水警報（27日9時43分）や土砂災害警戒情報（27日10時15分）が発令された（佐賀地方気象台，2019）。武雄市では27日18時に市内全域に避難勧告が発令され、翌日の28日4時には高橋観測所で避難勧告等の目安の一つとなる高橋川の水位が氾濫危険水位の2.11m、4時40分には武雄川でも杉橋水位観測所で氾濫危険水位の3.71mに達した。六角川では4時20分には指定河川洪水予報が発令され、5時45分には市内全域に避難指示（緊急）が発令された。

その後、7時20分には杉橋水位観測所、20時には高橋水位観測所で氾濫危険水位を下回った。佐賀県がまとめた避難者数は、8月28日10時の時点で武雄市の避難所（指定避難所・その他の合計）には10世帯・16人で、災害翌日の29日5時でも指定避難所には117世帯・250人しか避難していない。大多数の市民は自宅に止まったり、親類・知人宅等に避難していたと推察され、避難所への避難者は武雄市の人口48,900人の0.5%に過ぎず、避難のあり方やタイミングに大きな課題を残した（武雄市，2019）。

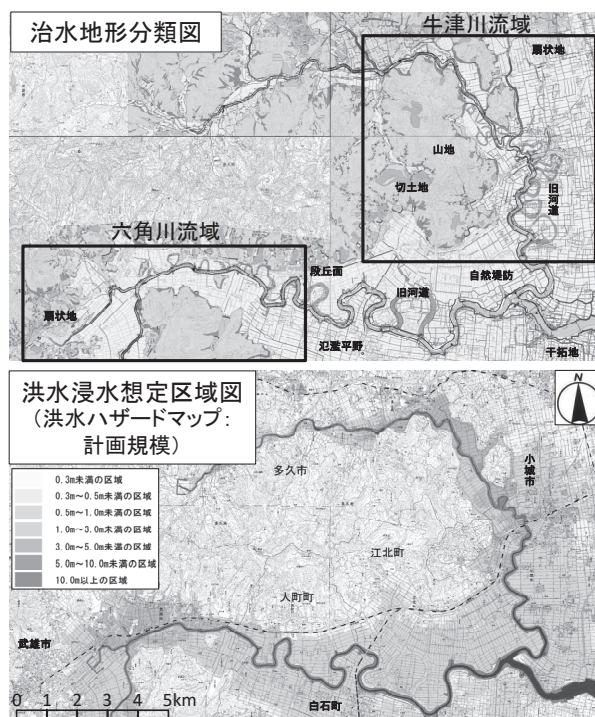


図5 六角川と牛津川流域の治水地形分類図（上、□は浸水深調査の範囲）（国土地理院，2019）と六角川水系洪水浸水想定区域図（洪水ハザードマップ：計画規模）（下）（九州地方整備局 武雄河川事務所，2016）（本調査報告では、牛津川流域は除く）

6. 六角川流域における洪水災害の実態

1) 大町町

図6にはDEM (Digital Elevation Model) を用いて作成した標高図と著者らによる現地での浸水痕跡調査から作成した浸水深 (cm) の分布図を示した。なお、浸水深の調査では、地盤から建物地盤までと建物地盤から建物の浸水痕跡を足した値を浸水深 (cm) とした。国土交通省武雄河川事務所の推定浸水深 (m, 図は省略) と図6とを比較すると、推定浸水深と実測した浸水深はほぼ一致しているが、武雄市の長崎街道の北側の街区や六角川右岸の南側の浸水深などには違いが認められており、正確な浸水被害の把握には、現地での詳細な踏査による調査が必要であることが改めて示唆された。

れた鉄の熱を冷ますために用いられていた油が雨水とともに流出した。鉄工所から中島地区に油が流れ出し、順天堂病院の福母地区へと向かっており、写真の下部に写った下潟排水機場に到達している。油が混じった雨水が六角川に排出されて有明海に流れ下ると、海苔の養殖や水産業に大きな影響を及ぼすことから、写真3(1)に示したようにオイルフェンスを設置して六角川への油の流入防止が実施された (2019年9月2日撮影)。さらに、大町町職員や自衛隊員らがボートで現場に入り、吸着マットや土のうを使って油の撤去や浸入防止作業に当たった (写真3(2))。なお、佐賀県は当初は約5万リットルと推定していた敷地外への流出量を不明としており、油の流失は約100haに広がり、住家約200戸、農地約41haに被害が発生している。

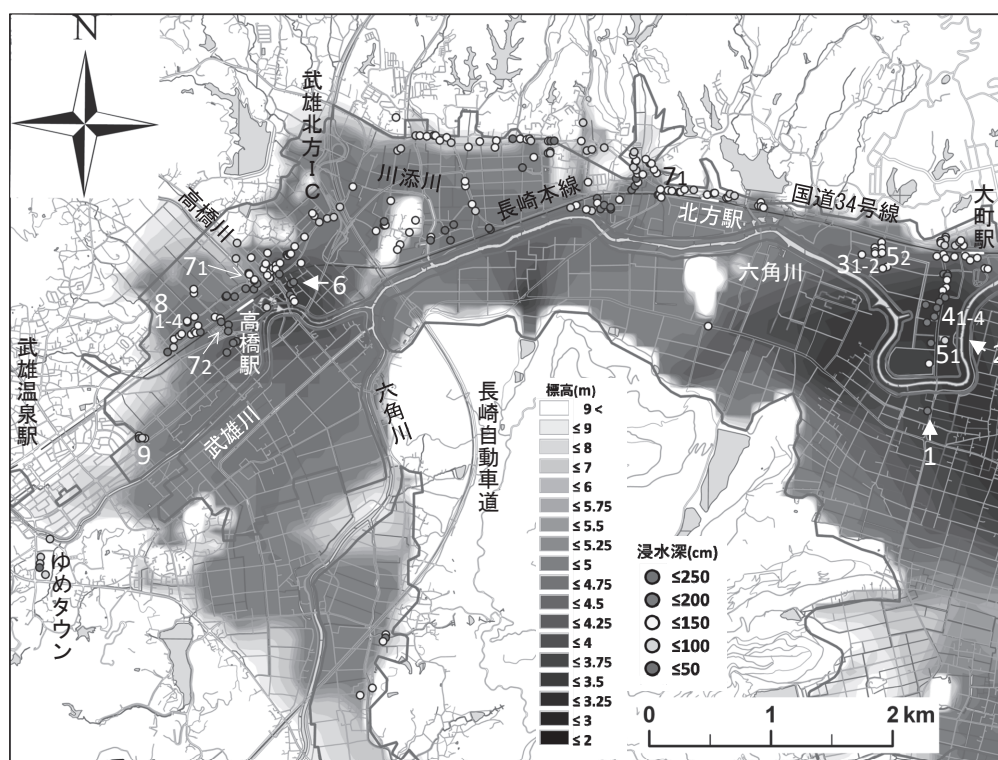


図6 六角川水系におけるDEM標高図と著者らによる現地での浸水痕跡調査から作成した浸水深 (cm) の分布図 (▲は写真の撮影方向、△は撮影場所)

写真1には、国土地理院が8月29日に撮影した大町町の空中写真を示した (国土地理院, 2019)。六角川が蛇行した堤防内の中央部分に順天堂病院があり、北西約300mに佐賀鉄工所が位置している。六角川には排水機場や樋門が設置され、大雨時には堤内に溜まった雨水を堤外の六角川に排出し、内水氾濫を防止する役割を担っている。JR九州の長崎本線と国道34号線が東西に走り、山裾に長崎街道が通っている。

写真2は共同通信社が8月28日に撮影した佐賀鉄工所から流出した油の状況である (共同通信社, 2019a)。鉄工所内に大量の雨水が流入し、精錬さ



写真1 大町町の空中写真 (8月29日撮影, 国土地理院, 2019, 地名等は筆者らが加筆)



写真 2 佐賀鉄工所から流出した油の状況（共同通信社（2019a），8月28日撮影）（写真中の数字は写真番号と一致，地名等は筆者らが加筆）



写真3 佐賀鉄工所から流出した油の吸着マットによる撤去（1），樋門の閉鎖とオイルフェンスの設置による六角川への油の流入防止（2）（2019年9月2日撮影）

大町町の福母地区にある順天堂病院は、1990（平成2）年の水害による浸水の実績に基づいて約130cmの盛土を行って病院を建設し、1999年に現在の場所に移転している（写真4(1)）。しかし、今回の災害では35～50cmの浸水被害に見舞われており、周辺の道路が冠水して併設する老人保健施設を含めて入院・入所者179人、医師や看護師等31人、自主避難した近隣の住民5人の計215人が取り残されて孤立する状況に陥った。自衛隊がボートで飲料水や食料を病院内に運び入れ、3階建ての2階以上に避難して人的被害は発生していないが、電気施設を始め一部の診療機器が浸水する被害を受けた。被災13日後に外来診療も再開されたが、長期にわたりコンピューター断層撮影（CT）やX線撮影が稼働出来ない状況となった。病院の南側に隣接する住家は地盤と同じ高さに立てられていることから、183cmに浸水の痕跡が確認でき、大きな被害を受けている（写真4(2)）。また、病院の北側に位置する薬局は、盛土がされていないため178cmの浸水被害に見舞われている（写真4(3)）。病院とJR長崎本線の間には下湯公民館や大町消防第二分団第六部の建物が立地しているが、いずれも200cm弱の浸水に見舞われている（写真4(4)）。内水氾濫による大町町の住家被害は、全壊79棟、大規模半壊71棟と、佐賀県全体の80%弱を占める甚大な被害となっており、住民からは「30年前の平成2年の水害の時も油が流出した」、「油や汚水の臭いが残って眠れない」、「家を補償はどうなるのか」といった不満がヒアリング調査からも聞かれ、佐賀鉄工所と住民との間で補償交渉が進められている。

写真5(1)に示したように、水田には油が流失した痕跡が黒い帯状に残っており、油の被害を受けた水田は約26haにも及んでいる。油が付着した水稻は破棄せざるを得ないことから、被害発生から1か月半近くが過ぎた10月6日にはコンバインによる刈り取り作業と装着したロールベアラーによる梱包作業が行われていた。本来なら収穫してもち米として市場に出荷される予定であったが、油が付着して残留しているため、梱包された水稻は焼却処分される。刈り取る作業を行っていた農家は「手塩にかけて育てた稲が刈り取られて焼却されることに大きな悲しみと憤りを感じる」と述べている。また、キュウリの施設ハウスでは170cmまで茎葉に油が付着して枯れ上がり、甚大な被害が発生している。キュウリ農家では再開の目途が立たない状況に陥っており、今後の影響が懸念されている（写真5(2)）。

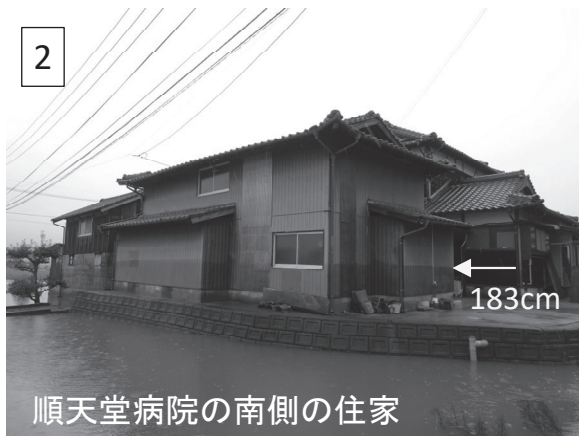
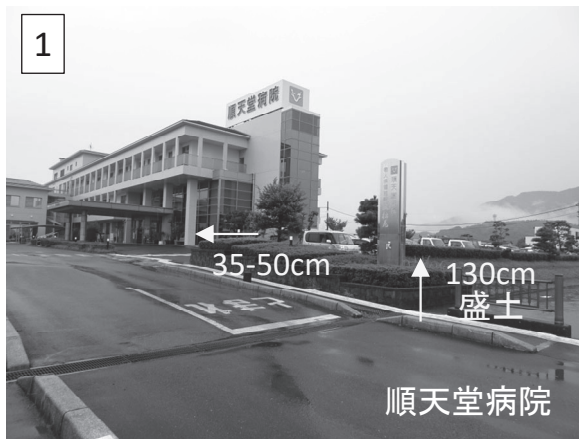


写真4 大町町の順天堂病院と周辺地域の浸水被害 (2019年9月2日撮影)

写真5 大町町における油が付着した農作物の被害 (2019年9月2日撮影)

2) 武雄市

写真6には、共同通信社が8月28日に撮影した六角川支流の武雄川と高橋川が合流する武雄市の高橋地区における浸水の状況を示した（共同通信社，2019b）。合流地点には高橋排水機場が1997年に整備され、堤内地に溜まった内水を3台のポンプで50m³/秒を六角川に排水する能力を有している（国土交通省 九州地方整備局 武雄河川工事事務所 他，2019）。豪雨が発生して六角川の水位が上昇した28日5時50分には、下流の新橋水位観測所の水位が図4にも示したように堤防の耐えうる計画高水位の6.94mを超えたため、堤防の決壊や越水を防ぐためにポンプを止める「運転調整」を余儀なくされ（令和元年8月六角川水系の水害を踏まえた防災・減災協議会，2019），堤内地の市街地に溜まった内水が排水できず内水氾濫が発生した。

しかし、ポンプが停止する1時間前の5時頃には高橋排水機場近くの住家では1m以上の水が押し寄せており（佐賀新聞，2019），高橋川水位観測所（写真9-1）の水位は3時に1.17m，ピーク時の7時には3.59m，ポンプ稼働後の10時過ぎでも3.27mであり，ポンプを稼働しても対応できないほどの多量の雨が降ったことが、内水氾濫を引き起こした大きな要因



写真 6 武雄市高橋付近の空中写真（共同通信社（2019b），8月28日撮影，地名等は筆者らが加筆）

川下流の六角川と合流する久津具地区は標高が周辺より低いことから、川添川の溢水により最高で240cmの浸水深が確認されており、今回の現地での浸水調査での最深の値となっている。

武雄市内の高橋宿は、陸路は長崎、水運は新堀津と呼ばれる荷揚げ場から伊万里、多久、白石へと通じており、江戸時代から明治までの約300年にわたり県西部の商業の中心として栄えた。高橋付近は1990（平成2）年の水害でも甚大な浸水被害に見舞われており、今回の水害でも高橋川の水が越水して110～160cmの浸水被害に見舞われている。水害の常襲地であることから、写真7(1)に示したように旧建設省の高橋水位観測所も150cmも嵩上げして観測所が設けられており、近接する住家では154cmの浸水深が認められている。長崎本線の南側の甘久川沿いの低平地に位置する武雄自動車学校では、校舎より低い車庫で175cmの浸水に見舞われており（写真7(2)）、武雄川と甘久川に挟まれた水田地帯の農家では190cmもの浸水痕跡が確認されている。

高橋川に架かる高橋橋を越えた武雄温泉側の旧国道34号線沿いには商業施設が立地しており、2005年には「複合商業施設メリーランド武雄」が開業し、多くの商業施設が入居している。和食の店舗は144cm、ボウリング場は145cm、スーパーマーケットは110cmと浸水被害に見舞われている反面、焼き肉店では107cmの嵩上げを行って店舗を建設しているため、最小限の被害で食い止めることが出来ている。また、隣接する複合機取扱店でも139cmの浸水に見舞われている（写真8）。なお、水害発生から半年後の調査では、キュービクル（特別高圧施設）やエアコンの

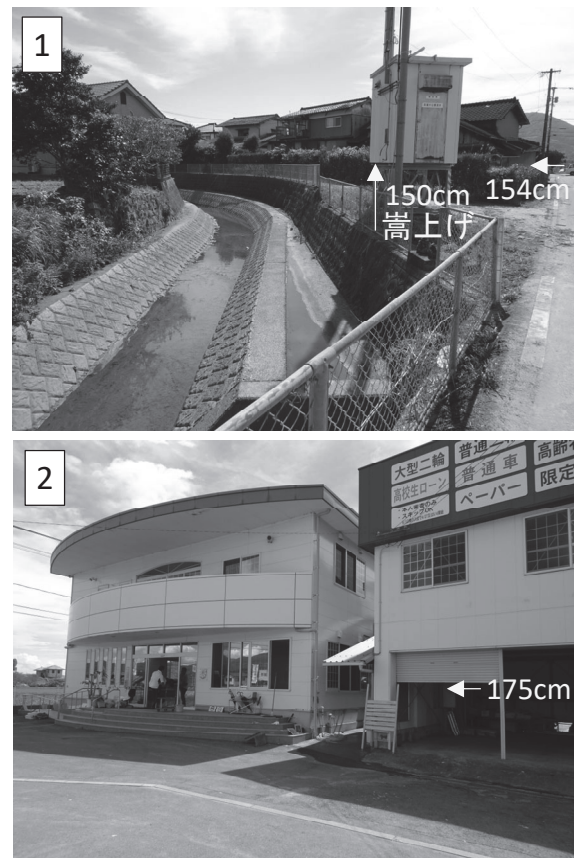


写真 7 高橋水位観測所(1)と武雄自動車学校の浸水高(2)（2019年9月5日撮影）

室外機を嵩上げしたり、防水壁を設けるなどの取り組みも進められている。これらの地域は、図5の洪水浸水想定区域図（洪水ハザードマップ）でも示したように、計画規模（100年に1度の確率）でも1～3m

の浸水が予測されており、1990年の水害でも甚大な被害に見舞われていることから、開業時に盛土や建

物の嵩上げを行うなどのハード面の対策を実施する必要があったものと示唆される。

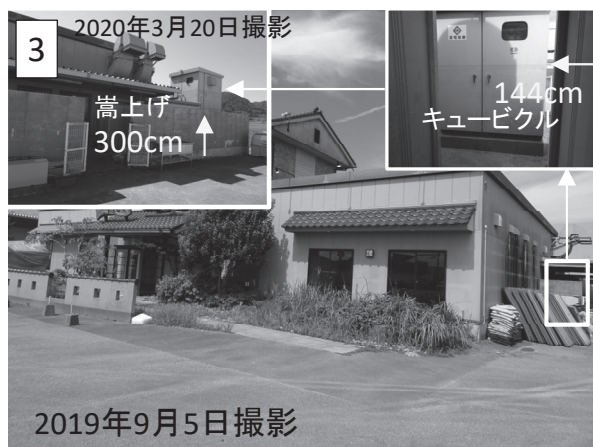


写真8 「複合商業施設メリーランド武雄」(2～4)と隣接する事務所(1)における浸水被害の状況
(2019年9月5日、2020年3月20日撮影)

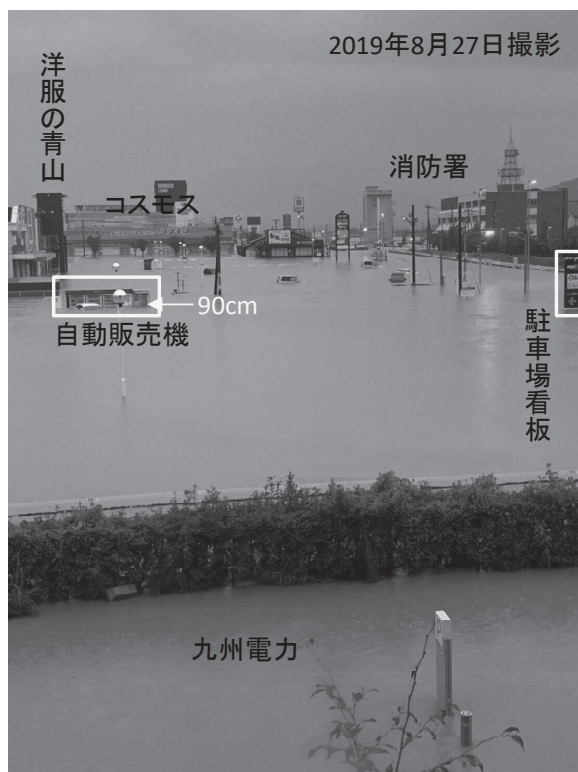


写真9 商業施設における浸水被害の状況
(左:2019年8月27日撮影(ずいきちさん, 2019)、
右:2020年3月20日撮影)

武雄川と甘久川に挟まれた低平地の水田地帯は、国道34号線バイパスの開通により農地転用が進み、2015年にホームセンター、自動車部品店、2017年に大型電気店、大型家具店、外食店などの郊外型の大規模店舗が数多く建設されている。写真9は水害当日に撮影された浸水状況をSNSに投稿された画像（ずんきちさん、2019）と現在の状況を比較したもので、駐車場に設置された自動販売機で90cmの浸水高が確認でき、浸水痕跡調査でも地盤高100cm弱の浸水被害に見舞われている。さらに、武雄川右岸の大規模店舗（ゆめタウン武雄）付近で最高約100cm、六角川上流で支流の東川との合流付近に位置する橘町片白・大日地区（潮見橋水位観測所の上流右岸）でも最高約150cmの浸水被害が発生している。

7. おわりに

今後は、被害の軽減に向けた治水対策として、遊水地等の洪水調節施設の整備、洪水が円滑に流れやすい河道の整備、河道内の土砂掘削による洪水流下断面の拡大により河川水位を低下させる取り組みを行うとともに、施設規模を上回る洪水に対する取り組みとして堤防天端の保護や堤防裏法尻の補強などの緊急管理型ハード対策の実施が計画されている（国土交通省武雄河川事務所他、2019）。

謝 辞

本調査研究では、気象庁の地上天気図、レーダーアメダス合成図、降水量データ等、国土交通省、佐賀県、長崎県、福岡県、杵藤地区広域市町村圏組合消防本部、大町町役場の雨量・河川水位データ等を使用させて頂いた。また、国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所の各種資料、国土地理院の「地理院地図」等を使用させて頂いた。さらに、共同通信イメージズからは、災害発生時に撮影された空中写真の転載のご許可を頂いた。本調査研究では自然災害研究協議会の調査研究費により実施した成果である。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡管区気象台：災害時気象資料 令和元年8月26日から30日にかけての佐賀県・福岡県・長崎県の大雨について、15p., 2019.
- 2) 気象庁：過去の天気図、2019年8月、2019a.
- 3) 気象庁：前線による大雨 令和元年（2019年）8月26日～8月29日26p., 2019b.
- 4) ウエザーニューズ：令和元年8月の前線による九州北部の記録的な大雨について、Wx Files, 51, 7p., 2019.
- 5) 佐賀県：令和元年佐賀豪雨（8月27日からの大雨）による被害状況等（人的被害：令和元年12月27日8時30分現在、住家被害：令和2年3月11日8時30分現在）、2019・2020.
- 6) 国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所：六角川水系洪水浸水想定区域図（計画規模：六角川・牛津川・武雄川）、2016.
- 7) 佐賀地方気象台：災害時気象資料 令和元年8月26日から30日にかけての佐賀県の大雨について、23p., 2019.
- 8) 武雄市：緊急・災害情報、2019.
- 9) 国土地理院：空中写真（斜め写真）、令和元年（2019年）8月の前線に伴う大雨に関する情報、2019.
- 10) 共同通信社：九州のコメ、際立つ不作 冠水した武雄市の住宅など 九州北部を襲った大雨で冠水した、佐賀県武雄市の住宅や田畑＝8月28日、2019a.
- 11) 共同通信社：今月下旬にも農地土壌検査 油が流出の佐賀県大町町 記録的大雨の影響で鉄工所（手前）から油が流出した佐賀県大町町＝8月28日、2019b.
- 12) 国土交通省武雄河川事務所・気象庁佐賀地方気象台・佐賀県・多久市・武雄市・小城市・大町町・江北町・白石町：排水ポンプの運転状況、令和元年8月豪雨を踏まえた「六角川水系緊急治水対策プロジェクト」中間とりまとめ 参考資料、29p., 2019.
- 13) 令和元年8月六角川水系の水害を踏まえた防災・減災協議会：六角川水系緊急治水対策プロジェクト、57p., 2019.
- 14) 佐賀新聞社：佐賀豪雨 ポンプ能力超えた雨が甚大な浸水被害に 停止前に冠水、流域全体の対策急務（2019年9月17日15時30分）、2019.
- 15) ずんきちさん：@zunkichi225（2019年8月27日18:04）、2019.

Flood triggered oil spills: Lessons from the Natech accident in Saga prefecture in August 2019.

Alessio MISURI^(1,7), Ana Maria CRUZ⁽²⁾, Hyejeong PARK⁽²⁾, Emmanuel GARNIER⁽³⁾, Nobuhito OHTSU⁽⁴⁾, Akihiko HOKUGO⁽⁵⁾, Isamu FUJITA⁽⁶⁾, Shin-ichi AOKI⁽⁷⁾, and Valerio COZZANI⁽¹⁾

(1) University of Bologna, Italy

(2) Kyoto University, Kyoto, Japan.

(3) University of Franche-Comté, France.

(4) National Research Institute of Fire and Disaster, Japan.

(5) Kobe University, Japan.

(6) Port and Airport Research Institute, Japan.

(7) Osaka University, Japan.

Synopsis

With the aim of extracting lessons learned, this study investigated a large oil spill at an ironworks factory in Saga prefecture, during the severe flooding that hit southwestern Japan in late August 2019. The oil spill dispersed by the flood waters contaminated adjacent crops, irrigation canals and citizens' homes in a large area of Omachi town. Many citizens had practiced vertical evacuation. Due to the oil spill, the pumping of flood waters had to be stopped to prevent further contamination, resulting in oil stagnating in the area for several days. This meant that residents had to be rescued from their homes in the middle of strong oil vapours. The oil spill's possible long-lasting impact in terms of health and environmental pollution requires monitoring and further investigation. The study found that oil spills caused by floods had already occurred at the same site, highlighting the need to improve risk management of chemical hazards, develop flood risk maps that consider the potential for these types of secondary events and other compound disasters, and propose more effective strategies for emergency planning and response.

1. Introduction

This study investigates an oil spill from an Ironworks factory in Saga Prefecture, Japan, triggered by severe flooding in late August 2019. The importance of the study lies in the fact that there is still relatively little work published concerning case studies of flood related technological accidents and their overall impacts.

This study contributes to the body of knowledge on technological accidents triggered by natural hazards (known as Natechs; see Showalter and Myers 1994; Krausmann *et al.* 2017) by elucidating the causes, direct and indirect consequences, and environmental impacts of the flood triggered oil spill.

Furthermore, the study analyses the emergency response and clean-up activities to identify lessons

learned, and propose recommendations to prevent, prepare for, respond and recover from future flood related Natech events.

According to a study by Sengul *et al.* (2012), where the authors analyzed chemical accidents reported to the National Response Center database in the United States in the period 1990-2008, hydrometeorological related accidents represented over 70% of all identified Natech events (26% rain induced, 20% hurricane induced, and 25% attributable to storms, winds, and other unspecified types of weather). Another study identified Natechs in the French chemical accident database called Analysis, Research and Information on Accidents

(ARIA)¹, finding that flood and storm related Natechs represented about 46% of reported Natech accidents in the database between 1992 and 2012 (French Ministry of Ecology and Sustainable Development, 2013).

Due to climate change, it is expected that some regions may experience stronger heavy rainfall events, as well as stronger tropical storms both of which can result in flooding. Thus, identifying lessons learned from past flood related Natechs is crucial for improved risk management, particularly in view of the possibility of more frequent severe floods due to a changing climate.

The heavy precipitation that hit southern Japan in late August 2019, caused unprecedented downpours and massive flooding over vast areas. Saga Prefecture, in Kyushu Island, was particularly affected and authorities registered precipitation levels about double the normal level for the time [2]. Thousands people were instructed to evacuate, main train stations were flooded and two people died [2–4]. Extreme rainfall events of this kind are likely to flourish both in terms of frequency and severity in the future. Indeed, the number of climate and weather-related disasters are growing in many areas worldwide along with their costs (NOAA, 2019; Natcat Munich Re, 2019). According to the recent World Economic Forum, extreme weather events and climate change became priority risks for the economy at the global level (World Economic Forum, 2020). Considering the case of Japan, the overall losses due to weather and hydrological disasters from 1980 to 2018 have been estimated at 129 billion US\$ (Natcat Munich Re, 2019). Moreover, according to IPCC, the risk related to extreme weather events is going to further increase in the foreseeable future due to climate change (IPCC, 2018). Recent research pointed out that the intensity of severe precipitations may increase in Japan as a consequence of the changing atmosphere air temperature during the current century [9][Nayak et al., 2018]. In addition to extreme rainfall events, previous research highlighted statistically significant increases in severe tropical cyclones (i.e., categories 3 and 4 on the Saffir-Simpson scale (Saffir, 1973; Schott et al., 2012; Ruckart et al., 2007; Misuri et al., 2019) hitting southern Japan (Yoshida et al., 2017).

It is not surprising then, that the oil spill investigated in this study is not a one-time event. In fact, as this study found, oil spills at the same Ironworks plant had occurred in the past, and structural mitigation measures had been adopted. The event in August 2019 exceeded the design level of the protection measures, which may indicate that more needs to be done to be better prepared for these

types of compound disasters in consideration of changing climate patterns. This study hopes to provide some insights and recommendations based on lessons learned from the accident.

2. Natechs caused by weather related hazards

Heavy rainfall, flooding and other hydrometeorological hazards may constitute potential triggers for hazardous material releases. The oil spill of August 28, 2019 in Saga prefecture is an example of a Natech event. Natechs represent about 3% of all reported chemical accidents in databases in the United States and Europe (Sengul et al., 2012; Xiaolong and Cruz 2020). More than a fourth out of the totality of all hazardous material releases triggered by natural hazard events in the United States were caused by rain between 1990 and 2008 (Sengul et al., 2012). Between 2000 and 2001, about 44% of chemical releases related to adverse weather conditions in United States (including weather disasters as hurricanes) was caused by rainfall (Ruckart et al., 2004).

Japan has suffered Natechs caused by hydrometeorological hazards in the past. The explosion caused by flooding brought by heavy downpours in an aluminium factory in Soja city Okayama Prefecture, in July 2018 serves as a recent example (Araki et al., 2020).

In this paper we investigate the oil spill caused by flooding in Omachi town, Saga Prefecture. The results are presented in the following sections.

3. Description of the event

Omachi town, the area of the accident, is mainly constituted by reclaimed land from the Ariake Sea; its geological history is clearly linked to the high flood proneness of the whole Saga plain. In the next section a brief historical background of the area together with a historical perspective on the recurrent past flooding events will be given, which should help the reader to understand the flood hazard the population is exposed to.

3.1 Historical background

Saga Prefecture mainly lies over a low flatland area. As can be seen from Figure 1, the actual coastline on the Ariake Sea is the result of centuries of soil reclamation activities which began around the 6th century (MLIT, 2011). The Saga plain is deeply characterized by the presence of the Rokkaku and Ushizu rivers, the two main fluvial systems of the

¹ ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents) database compiles data on chemical accidents and near miss events. ARIA is kept by the French Bureau for Analysis of Industrial Risks and Pollution.

region, whose basin area is of about 341 km² (MLIT, 2011). About 60% of the river basin is an inland water area, and the elevation of the plain is mostly between 0-3m ASL (MLIT, 2011). The river system is thus difficult to manage.

Indeed, the Ariake Sea tidal range reaches up to 6m, and in case of high tide, seawater flows upstream and may reach up to 29 km inland on the Rokkaku river (MLIT, 2011). It is not surprising thus that previous major floods that hit the region brought massive destruction.

To find more information on flood proneness of the region a historical research in the Japan Times (Japan Times 2020) archives was carried out.

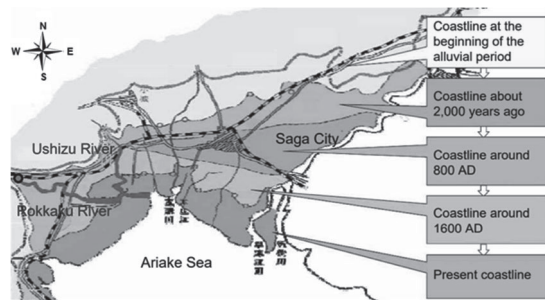


Figure 1. Coastline of the Saga low flatland area. The source of oil spill is indicated in red. Adapted from MLIT.

Twenty floods were identified which hit the capital of the region in the period of 1900-2009. The three most severe floods occurred in 1923, 1953 and 1990. The information retrieved gives also clear indications on the high frequency of floods affecting the region. Indeed, the set of floods identified corresponds to an average return period of 5.45 years (frequency of 1.83e-01/year) in the analyzed timespan. It should also be noted that an acceleration is highlighted between 1950 and 2009, with 14 floods reported (average return period of 4.2 years), compared to the previous 50 years (6 floods with an average return period of 8.3 years). This higher frequency might be explained considering possible underreporting in the past, but might also be an indication of climate change effects on the area.

Despite the research on Japan Times is restricted to the capital city, other sources confirmed that these events had a massive impact in the entire region. Indeed, during the floods of June 1953, more than 14,000 houses in the prefecture were flooded and many landslides were triggered due to soil failure (MLIT 2019). Again, heavy rain in August 1980 caused high waters to collapse river embankments and about 1700 houses were flooded (MLIT 2019). During a heavy rainfall event in July 1990, river embankments broke in 10 locations, leading to catastrophic flooding. Floodwater covered about 8000 ha of farmland and submerged the foundations of more than 5500 houses [38][MLIT 2019]. Another flooding event impacted the region in July

2009 (MLIT, 2019). Structural countermeasure against flooding were constructed and maintained such as embankments, dams, and retarding ponds. Furthermore, drainage pumps have been installed in the area to allow water discharge into the rivers (MLIT, 2011). Nevertheless, these measures have not been effective in case of extreme rainfall events. In the July 2018 rainfall event, which again led to widespread flooding, the river and pumping systems were so overburdened that embankments broke also in one area upstream on the Rokkaku river for the first time after 1990 (MLIT, 2019).

The town of Omachi, where the oil spill happened, is located along Rokkaku river's main channel. As it is highlighted in government flood hazard maps for the river system reported in Figure 2, the southern part of the municipality is exposed to flood hazard (MLIT, 2016). The map was created considering the worst-case scenario of inundation caused by the Rokkaku river water system. The rainfall scenario considered is of 424mm in 6-hour period (MLIT, 2016). As can be seen, the water height may reach up to 5m. The worst-case scenario approach is included in flood control evaluations since 2015, and the maximum rainfall scenario to be considered in simulations depends on the region in Japan considered and on the extent of the catching area of the river system (MLIT, 2015). It should be noted that the return period for this scenario is not provided, although in case the estimate results in a significantly lower rainfall severity compared to a 0.1% exceedance probability scenario, the severity of the latter is suggested to be assumed. Therefore, the flood hazard map reported in Figure 2 can be conservatively associated to a 1000-year return period (MLIT, 2015).

3.2 The floods of August 2019

From August 27th 2019, a rain front caused strong rainfall over a wide area of the Japanese island of Kyushu. In the morning of August 28th, a special rain warning was issued by the Japan Meteorological Agency (JMA) in Saga, Fukuoka and Nagasaki prefectures (JMA, 2019). The warning required immediate evacuation to designated sites in case it was possible, while in case this was not possible, citizens were instructed to move to highest floors of the closest solidly built buildings, away from cliffs and rivers, and in case neither this was feasible, they were required to promptly perform vertical evacuation for imminent catastrophe reaching highest floors of their houses (JMA, 2019). Consequently, an emergency evacuation order was issued by Fire Disaster Management Agency (FDMA) to more than 850,000 people in the three prefectures (Mainichi, 2019; Floodlist, 2019).

In Saga prefecture, observed rainfall levels exceeded the levels registered during the major flood of 1990 (MLIT, 2019) and caused a critical water inflow to the Rokkaku river water system. Indeed,

the peak level of the Rokkaku river reached 4.12m on August 28th, surpassing the level of 3.1m height indicating potential imminent flooding (MLIT, 2019-3). The Ushizu river, belonging to the same water system, surpassed 7.02m the same day, while the established flood danger level is 4.4m (MLIT, 2019). The latter river in particular experienced an unprecedented peak level even higher than the one reached in 1990 of 6.04m (MLIT, 2019). The unprecedented downpour thus led to the collapse of the Rokkaku river water system causing breaches from nine different locations and large-scale flooding involving more than 6900 ha of land and 2936 house units (MLIT, 2019).

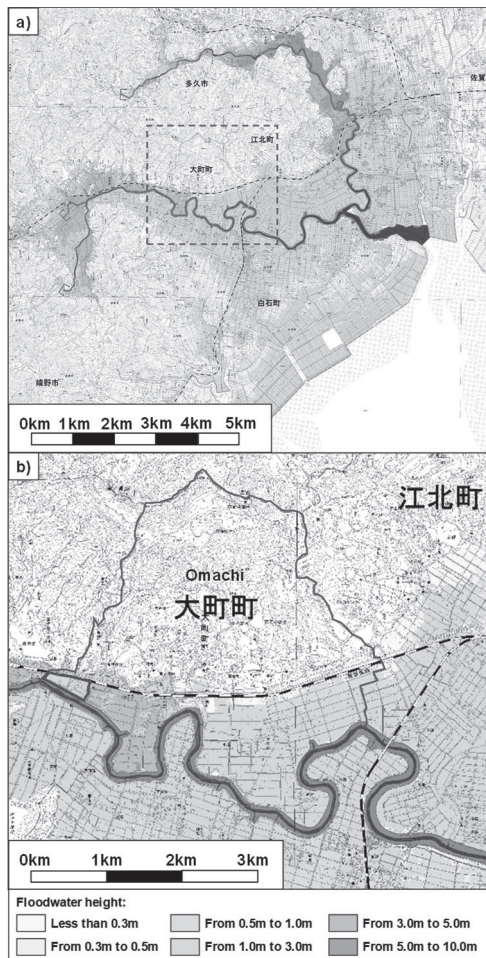


Figure 2. a) Flood hazard map for the Rokkaku river water system; red dashed line indicates Omachi town area reported in b). b) Detail of flood hazard map for Omachi town area; blue line indicates the position of ironworks factory. Floodwater height is estimated considering the worst-case rainfall scenario of 424mm (6-hour period) (MLIT, 2016).

The main transportation infrastructures were disrupted, landslides were triggered in many locations, many road connections were submerged, and train connections with the region were partially suspended due to flooding of principal stations

(Mainichi, 2019, Japan Times, 2019).

3.3 Oil spill at the ironworks factory

The factory involved in the oil spill accident is an ironworks plant specialized in production of high-strength bolts for automotive and agricultural applications (Nishinippon Shimbun, 2019). The manufacturing site is located less than 100m from the Rokkaku river embankment. The site has been running since 1969 and occupies a surface of about 99000m², while buildings occupy about 41000m² (Saga Tekkosho, 2019). The factory operates in continuous mode (i.e., 24h/ day). Some of the key steps for obtaining high performance bolts involve the use of heat treatments for hardening the surface in the final stages of the manufacturing process (Totten et al., 1993; MacKenzie, 2009). According to the available information, the plant performs a quenching operation in an oil bath kept in atmospheric storage tanks located 3m below ground level for safety matters, before the tempering treatment (Saga Shimbun, 2019). Quenching is one of the typical processes performed in metalworks to obtain specific mechanical characteristics and consists of the rapid cooling of heated pieces through large volumes of oil, water, or air (Totten et al., 1993; Totten et al., 2003; Abbaschian et al., 2009). One of the typical equipment design solutions for heat treatment of small parts as bolts is a furnace which is directly connected to quench tanks located below the conveyor level that the parts reach directly through a chute (Totten, 2007; Edenhofer et al., 2015).

According to a report in the Saga Shimbun, inside the thermal treatment building of the plant there were eight oil tanks with an overall capacity of more than 100,000 l of oil. Since the bolt production is carried out in a continuous regime, the quench tanks are not equipped with lids. Thus, it is difficult to seal them (Saga Shimbun, 2019).

The plant was flooded around 04:00AM on August 28 (Tellerreport, 2019). The protection measures in place for flood prevention were not effective. At the time of the accident, seven night shift workers were in the plant, and managed to stop operations around 04:30AM (Saga Shimbun, 2019; Tellerreport, 2019). A drainage pump was in place as a preventive measure, and there is contradictory information on whether the tanks were sandbagged or not (Nishinippon Shimbun, 2019; Tellerreport, 2019; Japan Times, 2019). Floodwater reached up to 60cm depth inside the plant, flowing into the tanks and lifting the stored oil (Saga Shimbun, 2019). Other sources report water inside the building reached 40cm, while outside it was about 70cm (Nishinippon Shimbun, 2019). According to the Saga Shimbun at 5:00AM the oil spill was confirmed by the workers that had to evacuate at 5:30AM due to the danger brought by the severe flooding and the oil spill. Around 6:30AM the oil outflowed from the

premises of the factory (Saga Shimbun, 2019).

The quantity of released oil was not clear at the beginning, and during a preliminary field survey conducted by the authorities on September 3rd estimated that about 110,100 l of quenching oil and about 3000 l of metal working oil were released inside the factory due to the floodwaters [54]. In a later estimation, the company declared that out of 103,000 l which were stored in the quench tanks the day before the accident, 49000 l were released but kept into the premises of the factory, while the remaining 54000 l spilled outside the plant [55].

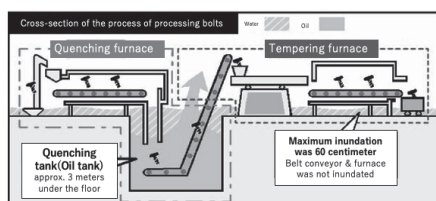


Figure 3. Simplified scheme explaining the dynamics of oil spill caused by flood. Adapted from (Saga shimbun, 2019).

The oil sheen spread to residential areas and over flooded agricultural fields, damaging dwellings and finally reaching the hospital that was isolated due to the flood. No patients or staff were injured, but they were stranded in the building due to oil-tainted floodwater (NHK, 2019).



Figure 4. Aerial view of the area impacted by the oil spill. Adapted from: <https://usagi-syufufulife.com/2019/08/31/2285>.

It should be noted that the same ironworks factory was involved in an analogous oil spill during 1990 floods [56]. After that accident, the heat treatment building was retrofitted with heavy shutters, and the floor level was raised by tens of centimetres to reduce the risk of water entering the oil tanks in case of future flooding [47]. Apparently

the 2019 flooding was a beyond-design-basis event, with an unforeseen intensity that made all the safety measures ineffective.

3.4 Characteristics of the spilled oil

The oil employed in thermal treatment processes needs to satisfy a number of critical properties required by technical application at high temperature. Indeed, quench oil formulations need to have acceptably high flash point and low volatility, so as not to catch fire during operation, need to be stable to avoid sludge formation and must have appropriate thermophysical properties to guarantee an efficient heat removal [45][Totten et al., 1993]. The oil employed in the facility is produced by a major Japanese oil company [55][Saga Shimbun, 2019]. Considering the atmospheric quenching process employed to achieve high performance parts, and consulting Safety Datasheets (SDS) of main products from major sellers for this kind of treatments [57][SDS master], these substances are likely classified as “Category 1” chemicals for aspiration toxicity, and according to Globally Harmonized System (GHS) terminology for hazardous properties classification [58][GHS]. This means the oil potentially poses an immediate threat to the population residing in the impacted area. Beside the acute effects to human health related to this class of substances, some high-performance oils employed for thermal treatment and metal working are mixed with small percentages of additives to enhance their thermal stability and reduce sludge formation [46][MacKenzie, 2009]. Some of these additives are also classified as hazardous substances. For instance, this oil category may contain cresols in low percentage, according to the safety data sheets (SDS) of commercial products for atmospheric quenching process (SDS Bright 2015). These chemicals are associated with an H410 hazard statement (according to the Global Harmonized System (GHS) International Standard), meaning these compounds are “Very toxic to aquatic life with long-lasting effects” (United Nations, 2019). Other commercial solutions for metal working may contain additives considered neurotoxic and potentially toxic for reproduction (Indemitsu Hermetic 2014). Typical hazardous properties of commercial oils employed in ironworks processes are reported in Table 1 below.






Given the hazardous properties of oils typically used for metal quenching, the long-term impact of the oil spill on the environment and public health should be monitored.

4. Post-disaster actions and damages

The water depth in the area where the oil spill occurred peaked at 3m in the aftermath of the accident (Tsukasa, 2019). In order to limit oil spreading and prevent it from reaching the Rokkaku river, five oil booms were set up from the morning

of August 28 and personnel from the Self-Defense Forces (SDF) and town officials were dispatched in the area to collect the oil (Tellerreport, 2019). Oil booms are physical floating barriers employed to limit the spreading of the oil, protecting specific target areas, and aiding cleanup activities (ITOF, 2011; Ghaly & Dave, 2011; Nuka, 2014).

Table 1. Some typical hazardous properties of commercial quenching oil solutions and additives.

GHS Pictogram	H-statement	Description
	H304	May be fatal if swallowed and enters airways.
	H361	Suspected of damage fertility or unborn child.
	H373	May cause damage to organs through prolonged or repeated exposure.
	H400	Very toxic to aquatic life.
	H410	Very toxic to aquatic life with long lasting effects.

Draining of flood waters started on the afternoon of August 28 and the overall flooded area of 6900 ha was reduced to 150 ha by noon of August 29, dispatching 45 drain pump trucks in total (Tsukasa, 2019). The oil clean up started on August 29 using oil absorption mats (Tellerreport, 2019; Umitonagisa, 2019). However, the area impacted by the spill could not be drained until measures to prevent the oil reaching the Ariake sea were secured. On the morning of August 30, an area of 70 ha was still flooded (Tsukasa, 2019). Later in the afternoon, the water level was reduced employing up to 16 water drain pump trucks and activating drainage gutters once oil barriers were successfully implemented around them. As results of flood water level reduction, the roads leading to the hospital were cleared and the structure was no longer isolated (Tsukasa, 2019).

It should be noted that the area impacted by the oil was significant and required the mobilization of up to 370 people from SDF per day in addition to volunteers and factory personnel (Saga Shimbun, 2019). The cleaning activities were declared officially concluded on September 10, two weeks after the spill, with the participation of more than 640 people on that day.

A local manager of a volunteer center, run by Open Japan, one of the NGOs that removed oil from houses, said: "We wanted to start the oil removal work immediately after the flood, but we couldn't get to the site because we had to wait until the water level got down for several days after the flood, so we

couldn't start the work. Difficulties of cleaning oil contaminated houses were unlike ordinary cleaning after water damage. Oil penetrates the inside of columns and walls, so even if we wash it, some oil and smell remain. Also, there were some difficulties because there were multiple residents or their relatives living in the contaminated area who were working in the factory where the oil spilled occurred. For them, it was difficult to claim damages to the factory strongly. "

In the months after the event, the company took additional measures to reduce the possibility that events of this magnitude could re-occur. Indeed, an oil fence approximately 90cm high has been installed inside the heat treatment plant surrounding the oil tanks. Moreover, permanent oil booms with a total length of about 600 meters have been installed along the east and south sides of the plant premises since these are the closest areas to the Rokkaku river (Nishinippon Shimbun, 2019). A part of the barrier is shown in Figure 5.

4.1 Preliminary damage assessment

This section is aimed at providing a preliminary evaluation of the damages brought by the oil spill. Clearly, new information is likely to be available while cleaning activities and damage assessment from the official institutions will be completed.



Figure 5. Permanent oil boom implemented in the south side of plant premises, in the closest area to Rokkaku river embankment.

(1) Residential damages

The government of Saga prefecture is releasing official information on the residential damages experienced by the population as consequence of the rainfall event of late August 2019. Damage to buildings are classified according to a severity qualitative scale spanning from the flooding of the basement only, to the complete destruction of the dwelling [68][Saga prefecture government website 2019]. Data available in the prefecture website are reported in Table 2.

As can be noted, considering the three most severe damage categories, the majority of reported damages occurred in Takeo city and Omachi town.

In order to consider the size of each municipality and thus given an estimate of the relative impact of the event on the residential buildings of the area, the number of households for each of them has been retrieved from multiple sources (National Statistics Center, 2019; Kouhoku Town, 2019; Omachi Town Office, 2019).

Table 2. Residential damages from the rainfall event organized in six categories. From left to right damage decreases in severity (i.e. complete destruction is the most severe). Data updated to December 10th 2019. Adapted from (Source: Saga Prefecture Government, 2020).

Area	Complete destruction	Large-scale destruction	Half-destruction	Partial damage (other than flooded)	Flooded floor	Flooded foundations (underfloor)	Total
Saga-shi (佐賀市)	3	-	2	4	405	2489	2903
Karatsu-shi (唐津市)	-	1	3	2	-	23	29
Tosu-shi (鳥栖市)	-	-	-	-	1		1
Taku-shi (多久市)	-	1	29	1	40	128	199
Imari-shi (伊万里市)	-	-	-	-	2	24	26
Takeo-shi (武雄市)	2	34	705	14	200	323	1278
Ogi-shi (小城市)	2	-	7	3	63	560	635
Ureshino-shi (嬉野市)	-	-	-	-	2	9	11
Kanzaki-shi (神埼市)	-	-	-	-	-	1	1
Arita-cho (有田町)	-	-	-	-	1	-	1
Omachi-cho (大町町)	79	71	4	-	17	130	301
Kouhoku-cho (江北町)	-	-	1	-	9	167	177
Shiroishi-cho (白石町)	1	-	-	-	20	441	462
Overall	87	107	751	24	760	4295	6024

For the majority of the locations it has been possible to find data in terms of number of households updated to 2018 (National Statistics Center, 2019). For the two smallest towns (i.e., Omachi-cho and Kouhoku-cho) in Saga prefecture, data from Japan Statistics Bureau were not available, and the number of households was retrieved from information available in municipality websites (Omachi Town Office, 2019; Kouhoku Town, 2019).

Results in terms of percentage of household damaged, assuming each household corresponds to a single dwelling are reported in Figure 6. As can be noted, the highest percentages for high severity damage categories (i.e., complete and large scale destruction) are experienced in Omachi-cho, where the oil spill happened, possibly due to the additional contribution of the Natech event to the already severe impact of floodwaters.

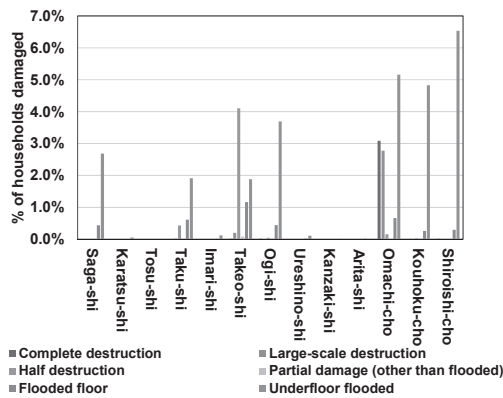


Figure 6. Percentage of households per city/town damaged by the rainfall event considering the six severity categories reported by Japanese authorities (Source: Saga Prefecture Government website).

(2) Land damages

Saga prefecture is releasing data on the extent of agricultural land damaged by the flooding event, with a specific focus on land impacted by the oil spilt

from the Omachi ironworks factory (Saga prefecture, 2019). An area of $4.18 \times 10^5 \text{ m}^2$ (41.8 ha) is assessed to be impacted by the oil. The impacted area was mainly dedicated to rice and soy farming.

The area has been sampled, and the assessment of oil concentration is still ongoing. The definition of the proper soil remediation strategy and the assessment of its cost are strongly dependent on the oil concentration which is found in the ground samples. A preliminary evaluation of cost directly connected to agricultural soil remediation activity is performed considering an analogous case of oil spill happened in Ryuo-cho in 2018 (Lake Biwa Environment Department, 2018). In that case, Japanese authorities implemented two different strategies following a threshold-based approach on the measured oil concentration in mg/kg. In case the oil concentration for an area is below a previously defined value of 100 mg/kg, the strategy which is followed is lime spreading in the soil without any additional measure. In case the threshold value is surpassed, the first layer of soil is replaced. In the case of Ryuo-cho, a layer 15cm thick was removed. The unitary cost of the two remediation strategies can be estimated directly from the information available in the governmental report on this past accident (Lake Biwa Environment Department, 2018).

Considering the impacted area, the soil remediation cost may range between 1.2×10^6 JPY and 7.82×10^8 JPY, according to the strategy that will be followed depending on the results of soil sampling.

According to recent news, the main strategy that will be implemented is lime spraying in the majority of surveyed sites, indicating that the oil concentration in soil samples is generally low. However, detailed data on the extent of the surface is not available to date (Economie FGG, 2020).

Table 3. Soil remediation strategies adopted in Ryuo-cho oil spill (2018). From (Lake Biwa Environment Department, 2018).

Remediation strategy	Implementation area (Ryou-cho, 2018) [m ²]	Implementation cost (Ryou-cho, 2018) [106 JPY]	Estimate unitary cost [(106JPY)/m ²]
Lime spreading	4.18×10^5	1.20	2.87×10^{-6}
Soil replacement	1.0×10^3	1.87	1.87×10^{-3}

5. Discussion

The case study presented throughout the paper offers a series of lessons on Natechs caused by flooding. First of all, it should be noted that the process employed by the facility to perform the thermal treatment is inherently unsafe when applied

in areas prone to flood hazard. It is clear that the presence of significant quantities of a hazardous substance accessible from the ground level is a poor design solution considering the possibility of water entering the tanks. Moreover, since the oil is lighter than floodwater, it may easily float out of the containment vessels if the amount of water entering is sufficient to cause overflow. The company

declared that the water level reached during the flooding of August 2019 was unexpected, and may have exceeded the design level of protection measures adopted after the previous oils spill incident. Given the possibility that extreme weather events such as the 2019 event, may reoccur, the company should evaluate either the implementation of different technology for thermal treatment, or the relocation of the plant to an area where the flood hazard is lower.

The company should consider the application of screening techniques for evaluation of barriers for accident prevention and mitigation. For instance, a Layer of Protection Analysis (LOPA) approach may be followed, defining a set of countermeasures, where each of them is independent and capable of preventing scenarios like the oil spill of August 2019 (Center of Chemical Process Safety, 2001).

It should also be noted that research on the potential for Natech accidents occurring in the metal processing industry is lacking. Indeed, this industrial sector was included in one research paper focused on the development of qualitative damage scales due to flooding only by Krausmann & Mushtaq (2008). It is worth noting that this category of industries in Japan have been involved in two other Natech accidents in 2018 (Environmental Agriculture Administration Standing Committee., 2018; Araki *et al.*, 2020), in addition to the case described in this work. This clearly points out that research efforts should be devoted to the development of strategies for reducing the risk of Natech accidents involving metal processing industries.

At the municipality level, the oil spill scenario should be considered when evaluating both emergency planning operations and damage assessment. Indeed, the area impacted by the substance sheen was the last one to be drained, possibly increasing the severity of the damages brought by floodwaters (e.g., dwelling foundations submerged for a long time). The presence of oil required also the implementation of specific measures such as oil booms and absorption mats, that may not be required in case of flooding scenarios not triggering hazardous substance releases. Moreover, it is clear the land use planning of the area did not consider the possibility of oil spills concurrent with flood events despite the fact that accidents have already occurred. As an example, the hospital was located in an area exposed to severe flood hazard (see Figure 2), and possibly for this reason the elevation of the soil where the structure lays is higher than the surrounding farmland. During the field inspection on the area, from the flood signs left on the external walls of the building it was clear that the water level reached about 30cm in the entrance. Nevertheless, the presence of the oil lead to isolation of the structure, a scenario that was apparently not considered. Therefore, the municipality should evaluate relocation of the

hospital, since it is a critical infrastructure and there is the possibility that compound disasters like this hamper severely its functionality.

6. Conclusions

In this work a recent Natech accident is presented. The accident involved the release of a large quantity of metal quenching oil as a consequence of massive flooding brought by severe downpours that hit southwest Japan in late August 2019. The oil spill slowed down emergency intervention and site clean-up activities, posing an additional burden on emergency teams. The factory involved in the oil spill had already experienced an analogous event in 1990, and the barriers designed after that event were reportedly not suitable to deal with the extreme rainfall the lead to the latest accident. The projection of climate change impacts in Japan, pose additional concerns on how extreme weather events may increase in severity and frequency in the future, enhancing the risk to the communities living around the ironworks plant are exposed, and other hazardous installations. The present work is not intended to be concluded, since damage assessment is still ongoing. Nevertheless, the case study presented should raise awareness on the severity of possible Natech accidents involving industrial sectors that are usually overlooked by regulatory frameworks and the scientific literature on the topic.

Acknowledgments

This study was possible thanks to funding by the Natural Disaster Research Council, Japan.

References

- Abbaschian R, Abbaschian L, Reed-Hill RE. Physical Metallurgy Principles. 4th ed. Stamford, CT: Cengage Learning; 2009.
- Antonioni G, Bonvicini S, Spadoni G, Cozzani V. Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events. *Reliab Eng Syst Saf* 2009;94:1442–50. doi:10.1016/j.ress.2009.02.026.
- Antonioni G, Landucci G, Necci A, Gheorghiu D, Cozzani V. Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods. *Reliab Eng Syst Saf* 2015;142:334–45. doi:10.1016/j.ress.2015.05.020.
- Araki Y, Hokugo A, Pinheiro ATK, Ohtsu N, Cruz AM. Evacuation activity after the explosion of an Aluminum Factory Caused by the July 2018 Japan Floods. *J Loss Prev Process Ind* 2020; In press.
- Bernier C, Padgett JE. Fragility and risk assessment of aboveground storage tanks subjected to concurrent surge , wave , and wind loads. *Reliab*

- Eng Syst Saf 2019;191:106571. doi:10.1016/j.ress.2019.106571.
- CCPS - Center of Chemical Process Safety. Layer of protection analysis: simplified process risk assessment. New York, NY: American Institute of Chemical Engineers - Center of Chemical Process Safety; 2001.
- Cozzani V, Campedel M, Renzi E, Krausmann E. Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. *J Hazard Mater* 2010;175:501–9. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.10.033.
- Cruz AM, Krausmann E. Vulnerability of the oil and gas sector to climate change and extreme weather events. *Climate Change*, 2013;41–53. doi:10.1007/s10584-013-0891-4.
- Cruz AM, Krausmann E. Damage to offshore oil and gas facilities following hurricanes Katrina and Rita: An overview. *J Loss Prev Process Ind.*, 2008;21:620–6. doi:10.1016/j.jlp.2008.04.008.
- Cruz AM, Krausmann E. Hazardous-materials releases from offshore oil and gas facilities and emergency response following Hurricanes Katrina and Rita. *J Loss Prev Process Ind* 2009;22:59–65. doi:10.1016/j.jlp.2008.08.007.
- Cruz AM, Steinberg LJ, Vetere-Arellano AL. Emerging issues for natech disaster risk management in Europe. *J Risk Res* 2006;9:483–501. doi:10.1080/13669870600717657.
- Economie FGG. Oil spill in farmland in Omachi - Lime spraying will be implemented from next month 2020. https://economifgg.blogspot.com/2020/01/blog-post_75.html (accessed January 29, 2020).
- Edenhofer B, Joritz D, Rink M, Voges K. *Carburizing of steels*. Woodhead Publishing Limited; 2015. doi:10.1533/9780857096524.3.485.
- Environmental Agriculture Administration Standing Committee. The oil spill accident in Ryuo-cho arch. 2018.
- Floodlist. Japan - Two people dead, thousands evacuated after floods and record rainfall 2019. <http://floodlist.com/asia/japan-floods-saga-nagasaki-fukuoka-record-rainfall-august-2019> (accessed January 28, 2020).
- French Ministry of Ecology Sustainable Development. The “NaTech” risk, or technological accidents triggered by a natural event. 2013.
- Ghaly AE, Dave D. Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis. *Am J Environ Sci* 2011;7:423–40.
- Idemitsu. Safety Data Sheet - Daphne Hermetic Oil. 2014.
- Idemitsu. Safety Data Sheet - Daphne Bright Quench M. 2015.
- Idemitsu. Safety Data Sheet - Daphne Master Quench A. 2015.
- IPCC. Global Warming of 1.5°C. 2018.
- ITOPF. Use of Booms in Oil Pollution Response - Technical Information Paper Number 3 2011. <http://www.itopf.org/> (accessed January 25, 2020).
- Japan Times. Archives of the Japan Times. Special permission granted by the Japan Times . <Accessed between December to July 2020> www.japantimes.co.jp
- Japan Times. Heavy rains in western Japan triggered evacuation orders for around 847000 residents. 2019. <https://www.japantimes.co.jp/news/2019/08/28/national/special-landslide-flood-warnings-issued-downpours-hit-western-japan/#.XjKYiGhKiUl> (accessed January 30, 2020).
- Japan Times. Oil leak at ironworks complicates disastrous flooding in Saga 2019. <https://www.japantimes.co.jp/news/2019/09/01/national/oil-leak-ironworks-complicates-disastrous-flooding-saga-prefecture/#.XXnaBSgzY2w> (accessed January 23, 2020).
- JMA. Special warning due to heavy rain issued in Saga, Fukuoka and Nagasaki prefectures. 2019.
- Kouhoku Town. Kouhoku town website 2019. <https://www.town.kouhoku.saga.jp/default.html%0D> (accessed December 19, 2019).
- Krausmann E, Cruz AM. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. *Nat Hazards* 2013;67:811–28. doi:10.1007/s11069-013-0607-0.
- Krausmann E, Cruz AM, Salzano E. *Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations*. Elsevier. 2016.
- Krausmann E, Mushtaq F. A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities. *Nat Hazards* 2008;46:179–97. doi:10.1007/s11069-007-9203-5.
- Krausmann E, Renzi E, Campedel M, Cozzani V. Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Lessons learned from a database analysis. *Nat Hazards* 2011;59:285–300.
- Landucci G, Antonioni G, Tugnoli A, Cozzani V. Release of hazardous substances in flood events : Damage model for atmospheric storage tanks 2012;106:200–16.
- Landucci G, Necci A, Antonioni G, Tugnoli A, Cozzani V. Release of hazardous substances in flood events: Damage model for horizontal cylindrical vessels. *Reliab Eng Syst Saf* 2014;132:125–45. doi:10.1016/j.ress.2014.07.016.
- Lindell MK, Perry RW. Hazardous materials releases in the Northridge earthquake: Implications for seismic risk assessment. *Risk Anal* 1997;17:147–56. doi:10.1111/j.1539-6924.1997.tb00854.x.
- Lindell MK, Perry RW. Identifying and managing

- conjoint threats: Earthquake-induced hazardous materials releases in the US. *J Hazard Mater* 1996;50:31–46. doi:10.1016/0304-3894(96)01764-5.
- MacKenzie DS. The chemistry of oil quenchant. *Heat Treat Prog* 2009;9:28–32.
- Mainichi. Heavy rains in northern Kyushu - Special warning for heavy rains - Evacuation orders for 850000 people 2019. <https://mainichi.jp/articles/20190828/k00/00m/040/104000c> (accessed January 28, 2020).
- Misuri A, Casson Moreno V, Quddus N, Cozzani V. Lessons learnt from the impact of hurricane Harvey on the chemical and process industry. *Reliab Eng Syst Saf* 2019;190. doi:10.1016/j.ress.2019.106521.
- MLIT. New Contingency Plan - Takeo Office. Takeo, JP: 2011.
- MLIT. Notification 896 (2015 July 17th) - Maximum rainfall scenario. 2015.
- MLIT. Expected flood inundation area map for the Rokkaku river water system. 2016.
- MLIT. Rokkaku River Emergency Flood Control Project. 2019.
- Munich Re Group. NatCatSERVICE Relevant natural loss events worldwide 1980 – 2018 2018. <https://natcatservice.munichre.com/> (accessed March 1, 2019).
- National Statistics Center. e-Stat - Portal Site of Official Statistics of Japan 2019. <https://www.e-stat.go.jp/en> (accessed December 20, 2019).
- Nayak S, Dairaku K, Takayabu I, Suzuki-Parker A, Ishizaki NN. Extreme precipitation linked to temperature over Japan: current evaluation and projected changes with multi-model ensemble downscaling. *Clim Dyn* 2018;51:4385–401. doi:10.1007/s00382-017-3866-8.
- NHK news. Floods and landslides in western Japan 2019. https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/news/20190829_04/ (accessed November 20, 2019).
- NOAA. U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters 2018.
- Nishinippon Shimbun. Oil Spill, measures of 30 years ago were unsuccessful - Ironworks Omachi factory discussion with the government 2019. <https://www.nishinippon.co.jp/item/n/545136/> (accessed December 15, 2019).
- Nuka. Spill tactics for Alaska Responders. Seldovia, Alaska: 2014.
- Omachi newspaper. Record heavy rain caused damages in many areas! City Omachi 1990:2.
- Rasmussen K. Natural events and accidents with hazardous materials. *J Hazard Mater* 1995;40:43–54. doi:10.1016/0304-3894(94)00079-V.
- Ruckart PZ, Borders J, Villanacci J, Harris R, Samples-Ruiz M. The role of adverse weather conditions in acute releases of hazardous substances, Texas, 2000-2001. *J Hazard Mater* 2004;115:27–31. doi:10.1016/j.jhazmat.2004.05.004.
- Ruckart PZ, Orr MF, Lanier K, Koehler A. Hazardous substances releases associated with Hurricanes Katrina and Rita in industrial settings, Louisiana and Texas. *J Hazard Mater* 2008;159:53–7. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.124.
- Saffir HS. Hurricane Wind and Storm Surge. *Mil Eng* 1973;423:4–5. doi:10.2307/44566124.
- Saga Prefecture. Damage caused by the heavy rain in Saga (heavy rain since August 27th) 2019. <https://www.pref.saga.lg.jp/bousai/kiji00370893/index.html> (accessed December 11, 2019).
- Saga Prefecture. Damage related to agriculture, forestry and fisheries related to the Saga heavy rain disaster (R1.9.10) 2019. http://www.pref.saga.lg.jp/bousai/kiji00370822/3_70822_147023_up_o44pp75c.pdf (accessed December 16, 2019).
- Saga Shimbun. Oil recovery proceeds steadily with human tactics 2019. <https://www.saga-s.co.jp/articles/-/425657> (accessed January 23, 2020).
- Saga Shimbun. Oil spill at the ironworks, 110000 liters spilled - Volume outside the factory is unknown 2019. <https://www.saga-s.co.jp/articles/-/426676> (accessed January 23, 2020).
- Saga Shimbun. Oil spills out of the iron factory “exceeded” - Residents say “same as 30 years ago” 2019. <https://www.saga-s.co.jp/articles/-/422825> (accessed December 12, 2019).
- Saga Shimbun. Saga ironworks findings: 54000 liters of oil spilled 2019. <https://www.saga-s.co.jp/articles/-/437962>.
- Saga Tekkosho Co. Ltd. Omachi factory datasheet 2019. https://www.dextech.co.jp/modules/pico/index.php?content_id=15 (accessed December 12, 2019).
- Schott T, Landsea CW, Hafele G, Lorens J, Taylor A, Thurm H, et al. The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. NOAA Tech Rep 2012. https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshs_table.pdf (accessed December 19, 2018).
- Sengul H, Santella N, Steinberg LJ, Cruz AM. Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. *Disasters* 2012;36:723–43. doi:10.1111/j.1467-7717.2012.01272.x.
- Showalter PS, Myers MF. Natural Disasters in the United States as Release Agents of Oil, Chemicals, or Radiological Materials Between 1980-1989: Analysis and Recommendations. *Risk Anal* 1994;14:169–82. doi:10.1111/j.1539-6924.1994.tb00042.x.
- Suarez-Paba MC, Perreux M, Munoz F, Cruz AM. Systematic literature review and qualitative meta-analysis of Natech research in the past four decades. *Saf Sci* 2019;116:58–77. doi:10.1016/j.ssci.2019.02.033.
- Tellerreport. Recovery of spilled oil due to heavy

- rain - Difficult to reach Omachi-cho, Saga 2019.
<https://www.tellerreport.com/post/2019-08-29---heavy-rain-spilled-oil-recovery-work-difficult-to-reach-saga-omachi-cho-%7C-nhk-news-.HyedR0ESr.html> (accessed January 23, 2020).
- Tellerreport. Saga oil spill company executives apologize insufficient measures 2019.
<http://www.tellerreport.com/post/2019-08-30---saga-oil-spill-company-executives-apologize-insufficient-measures-%22sorry%22-%7C-nhk-news-.BkZ4Nbv8HH.html> (accessed November 15, 2019).
- Totten GE, Bates CE, Clinton NA. Handbook of quenchant and quenching technology. Materials Park, OH: ASM International; 1993.
- Totten GE. Steel Heat Treatment - Equipment and Process Design. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2007.
- Totten GE, Webster GM, Bates CE. 20 - Quenching. In: Totten GE, MacKenzie DS, editors. Handb. Alum., Taylor & Francis; 2003, p. 971–1062.
- Town O. Omachi website 2019.
<http://www.town.omachi.saga.jp/> (accessed December 20, 2019).
- Tsukasa M. Water disaster countermeasures based on large-scale wide-area torrential rain. 2019.
- United Nations. Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). 8th ed. Geneva, Switzerland: 2019.
- Umitonagisa.org. Correct Knowledge of oil sorbents 2019.
<http://www.uitonagisa.or.jp/pdf/kyutyakuzai.pdf> (accessed January 23, 2020).
- World Economic Forum. The Global Risks Report. Cologny, Switzerland: 2020.
- Yoshida K, Sugi M, Murakami H, Ishii M. Future changes in Tropical Cyclone Activity in High-resolution large-ensemble simulations. *Geophys Res Lett* 2017;44:9910–7.
- Xiaolong, L and Cruz, AM Extracting Natechs from large databases: Development of a semi-intelligent Natech identification framework. *International Journal of Disaster Risk Science* 2020; In press.
- Zuluaga S, Sánchez-silva M, Ramírez OJ, Muñoz F. Development of parametric fragility curves for storage tanks : A Natech approach. *Reliab Eng Syst Saf* 2019;189:1–10.
doi:10.1016/j.ress.2019.04.008.

(Completed August 23, 2020)

SAR画像を用いた千曲川氾濫域抽出と浸水深推定

朝位 孝二*・白水 元*

* 山口大学大学院創成科学研究科

要 旨

令和元年10月に発生した台風19号は中部日本、東日本に甚大な被害をもたらした。長野県を流れる信濃川水系千曲川においても堤防の破堤や越水に起因する外水氾濫が発生した。本報告ではALOS2の合成開口レーダー（SAR）画像を用いて千曲川流域の浸水域と浸水深の推定を行った。長野市穂保地区のSARによる推定浸水域は国土交通省資料のそれと同等であった。浸水深については実測値と比較してばらつきがあるが、2m以上の深いところでは整合性が良かった。飯山市では定量的評価はできなかったが定性的には妥当と思われる。

1. はじめに

令和元年（2019年）10月1日頃に形成が始まった低圧部はその後発達を続け、10月6日3時に南鳥島近海で台風19号（Hagibis）となった。台風になった時点での中心気圧は1000hPaであったが、わずか42時間後には915hPaまで一挙に気圧が低下した。急に発達した台風19号は勢力を維持したまま小笠原諸島に接近し、12日19時前に伊豆半島に上陸した。関東地方の平野部を縦断して13日未明には福島県沖の太平洋上に抜け13日12時には温帯低気圧に変わった。

この台風により関東地方、甲信地方、東北地方になどで豪雨をもたらし、全国で死者104名、全壊家屋3308件となる甚大な被害となった（内閣府2020）。

また堤防決壊も多く国管理河川では6水系7河川14箇所、兼管理河川では宮城県、福島県、茨城県、栃木県、埼玉県、新潟県、長野県で128箇所に上る。千曲川、那珂川、阿武隈川、久慈川などの一級河川や支川などの氾濫が多く引き起こされた（内閣府2020）。

今次災害のように広域かつ多岐にわたって氾濫が発生している場合には、その被害全容を知るには多くの時間や手間を必要とする。そこで人工衛星によるリモートセンシングが災害状況把握の上で有力な手法と期待され、甚大な災害の発生後に各国の衛星によって撮影が行われている。

災害後短時間で被災地の画像を取得し被災状況の把握や二次災害の危険察知を目的として、Lバンド合

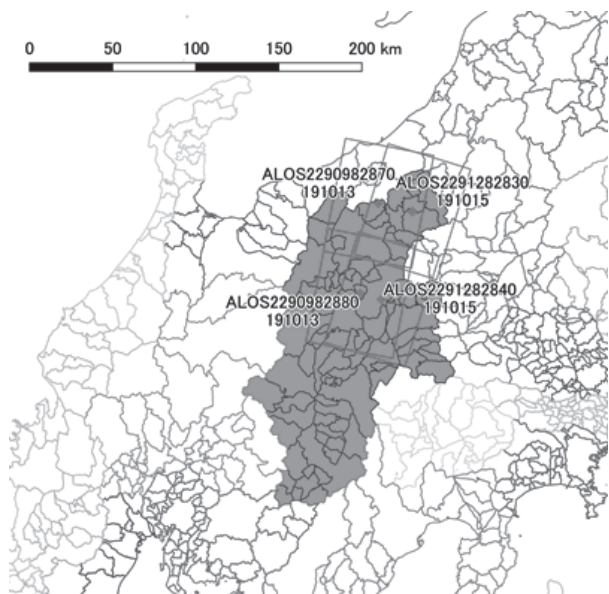


図-1 各シーンの観測範囲

成開口レーダー「PALSAR-2」を搭載した陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（ALOS-2）が運用されている。合成開口レーダー（SAR）は人工衛星から電磁波を放出し、地面におけるマイクロ波の後方散乱の強度を計測するもので、気象衛星に代表される光学画像と異なり夜間や曇天時にも観測が可能である。加えて、PALSAR-2に搭載されるLバンド帯は長波長で透過性が高く、降雨や雲による減衰に強いいため豪雨による河川氾濫や浸水などの気象災害に対して有

表-1 発災直後の千曲川流域を対象とした高分解能モード1での観測

シーン ID	観測日時 (JST)	衛星進行 方向	観測方向	オフ ナディア角	偏波
ALOS2290982870-191013	2019/10/13 11:56	ディセンディング	右側	25.6	HH
ALOS2290982880-191013	2019/10/13 11:56	ディセンディング	右側	25.6	HH
ALOS2291282830-191015	2019/10/15 12:37	ディセンディング	左側	42.7	HH
ALOS2291282840-191015	2019/10/15 12:37	ディセンディング	左側	42.7	HH
ALOS2238710760-181024	2018/10/24 23:01	アセンディング	左側	32.4	HH

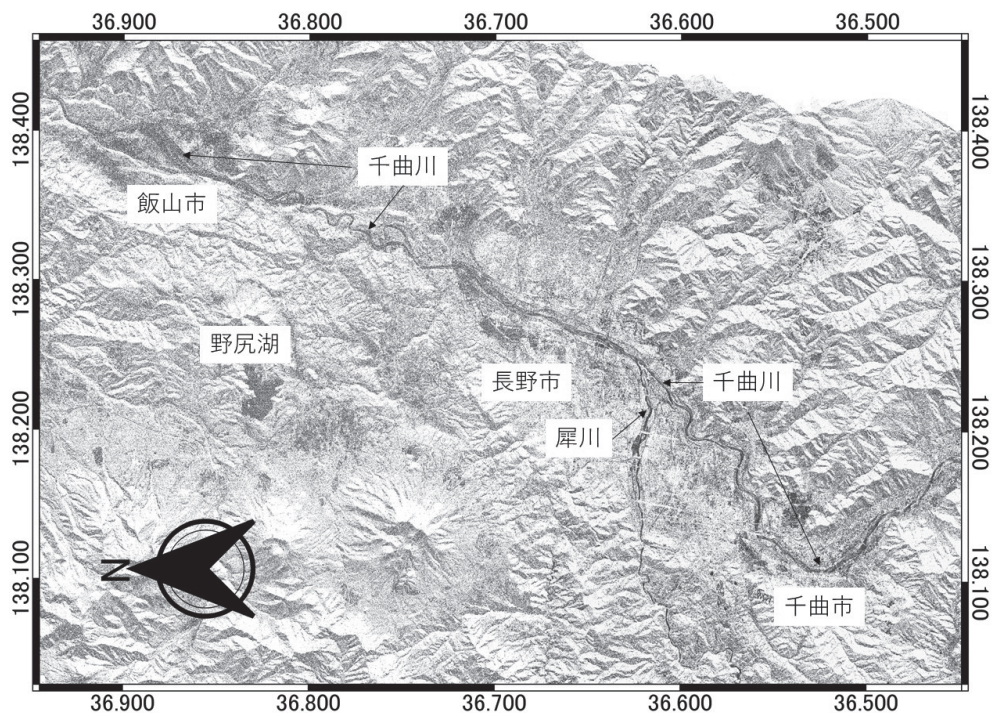


図-2 千曲川流域の観測結果

力な観測手段である。本稿ではだいち2号を運用するJAXAから提供されたPALSAR-2によるレーダー画像もとに千曲川流域の浸水域および浸水深の推定結果を報告する。

2. 千曲川流域の観測概要

千曲川流域を対象とした発災直後のPALSAR-2による観測は、10月13日11時56分開始、および、15日12時37分開始の高分解能モード1（単偏波、観測幅50 km、分解能 3 m）のものがある。これらの観測範囲について図-1に示す。また、表-1に観測条件の概要を示す。衛星進行方向は衛星の南北の移動方向を示し、ディセンディングは南下しながらの観測であることを示

す。北上中の観測の場合はアセンディングと表現される。また、観測方向は進行方向を正面として左側にセンサを振った観測か右側に振った観測かを示す。オフナディア角は衛星の直下と衛星から観測対象中心を覗いた線とがなす角である。

本研究では、この観測のうち、浸水状況をよく反映した13日観測のシーンALOS2290982870-191013を対象に解析を行った。当該シーンのレーダー画像プロダクトは処理レベル2.1で、後述の解析時にはスペckルノイズ低減を目的にLee filter処理を付加している。また発災前の画像として2018年10月24日に観測されたALOS2238710760-181024を用いた。

図-2は2019年10月13日のSAR画像で、低散乱域を青く強調表示している。電磁波は地面に対して斜め

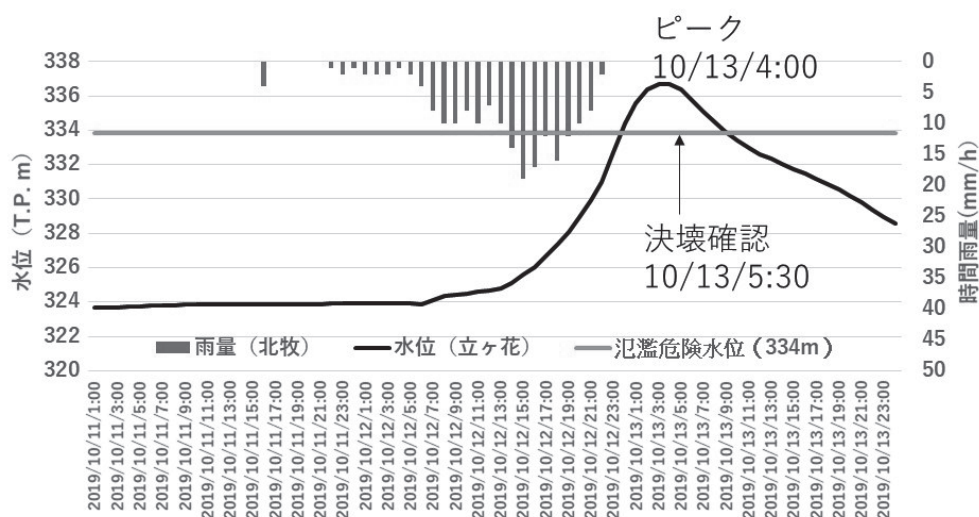


図-3 立ヶ花の水位と北牧の雨量

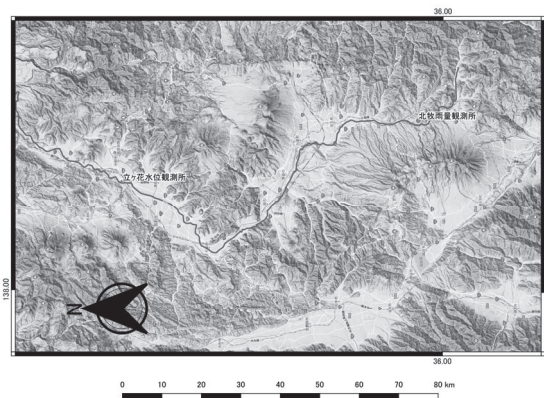


図-4 水位観測所と雨量観測所の位置

に入射するため、水面は鏡のように電磁波を入射方向とは逆方向に反射させるので散乱強度は小さくなる。一方、大地や建物の多い市街地は散乱強度が大きくなる。よって低散乱域は水域と見なすことができる。ただし、河川や湖沼など氾濫によらない水域も散乱強度は小さいため、氾濫域と自然の水域との区別を既存のマップなどで行う必要がある。

図-2には濃い青色で千曲川と犀川が捉えられている。また長野市市街部の左岸には濃い青色が広がっているが、この部分が破堤による浸水域である。また飯山市周辺にも濃い青色が広がっており、浸水を示している。

3. 長野市穂保地区の浸水域・浸水深

3.1 河川水位の状況

長野市穂保周辺では千曲川左岸側堤防の決壊により甚大な氾濫被害を受けた。最寄りの立ヶ花水位観測所の水位を図-3に示す。観測上は破堤箇所からお

よそ8.5km下流側に位置している。水位はT.P.表示である。また参考までに、北牧の時間雨量も示している。北牧雨量観測所と立ヶ花水位観測所は80kmほど離れている。両観測所の位置関係を図-4に示す。

氾濫危険水位は334mであるが、10月12日22:00頃に氾濫危険水位に到達している。北牧における降雨のピークは10月12日14:00頃であるが、立ヶ花における水位のピークは13時間遅れて10月13日4:00である。その後水位は低下し、13日8:00に氾濫危険水位まで低下した。氾濫危険水位を超えた時間はおよそ9時間であった。

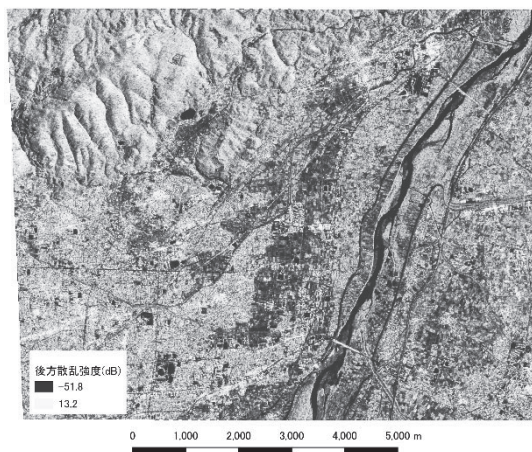
国交省資料（2020）によれば10月13日0:55に堤防越水が確認されている。立ヶ花の氾濫危険水位到達からおよそ3時間である。堤防決壊が確認されたのが同日5:30であるので、ピークからおよそ90分後である。実際に破堤したのはそれよりも早かった可能性はある。

3.2 長野市穂保地区の浸水域・浸水深

本節では、前述の発災直後の観測によって得られたSAR画像を解析し、長野市の穂保地区における浸水深分布を示す。また浸水痕跡高の実測結果との比較を行い、適合性を評価する。

図-5は発災前後のSAR画像である。図-5(a)が発災前（2018年10月24日12:37）であり図-5(b)が発災前（2019年10月13日11:56）である。発災後の観測時刻は堤防決壊確認時刻からおよそ6.5時間後である。観測時刻の立ヶ花の水位は332mであり、避難判断水位（T.P.333.4m）を下回っていたが氾濫注意水位（T.P.329.3m）はまだ3mほど上回っていた。

発災前の千曲川の水位は低いため砂州を確認できる。また左岸側に青色の領域が広がっているが、この場所は圃場であり、散乱強度が低下しているもの



(a) 2018 年 10 月 24 日の観測

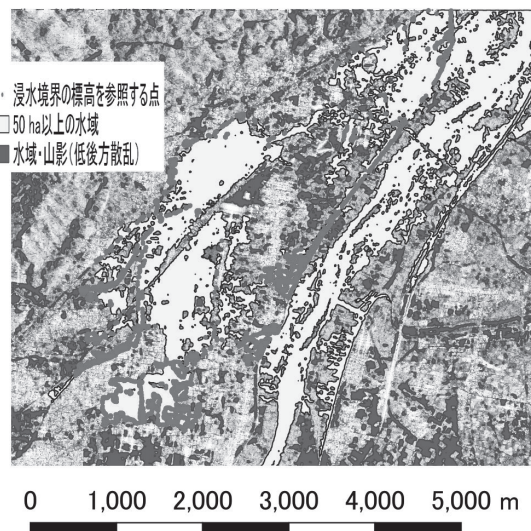
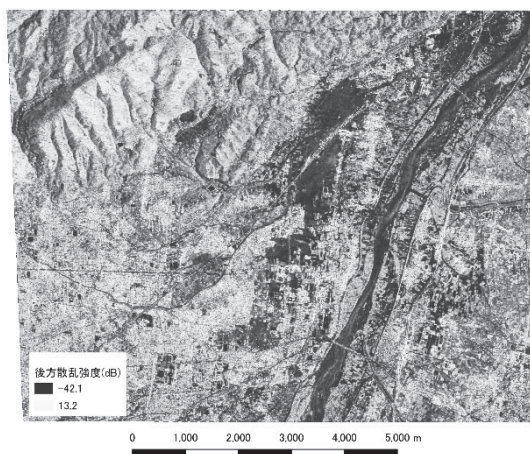


図-6 SARによる長野市穂保周辺の浸水域



(b) 2019/10/13 の観測

図-5 発災前後の画像の比較

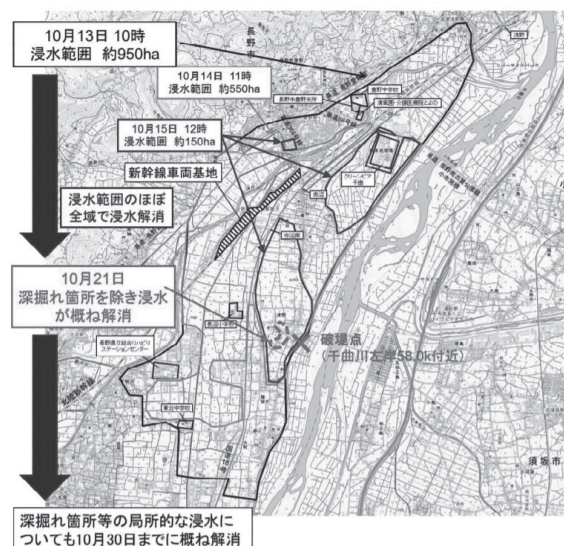


図-7 千曲川破堤箇所近傍の浸水範囲 (国土交通省 2019)

と思われる。一方、発災後では前述のように千曲川の水位は低下しておらず発災前画像と比較して水面幅が広いことがわかる。また青色の範囲も広がっており浸水の様子が捉えられている。

大木 (2016) らに倣い、SAR画像から恒常的に水域である箇所を多数サンプルとし、水域の後方散乱係数の平均値 μ および標準偏差 σ を求めた。後方散乱係数が $\mu+\sigma$ 以下となる箇所を二値化し水域として抽出した。この水域の分布を示すラスター画像にMajorityフィルタを適用した後ポリゴン化した。そのうち、広大な面積のポリゴンについてポリゴン辺縁の地盤高データ (国土地理院5 mメッシュDEM) を参照して浸水域の水面高を仮定した。ここではその水面高を仮想水面と呼ぶ。図-6は上記の処理を行って得られた浸水域である。河川増水を含み、今回の外水氾

濫で生じた水域を黄色で示した。氾濫に起因しない水域や山影で散乱強度が低下した部分は紫色で示している。

比較のため図-7に国土交通省 (2019) の浸水範囲図を示す。概ね浸水域は一致しているが、SAR画像では浸水域内において浸水と判断されない領域 (黄色のポリゴンで示されていない箇所) もある。この部分は家屋建物、樹木などが密に存在している箇所ので、電磁波が散乱するため散乱強度が低くならなかったためである。

黄色で示された水域ポリゴンのうち、河川でない箇所でも水域となったポリゴンを図-6中の赤色の点で示している。この点の地盤高を仮想水面高 (氾濫水域の水位) とした。複数ある仮想水面高の平均値を

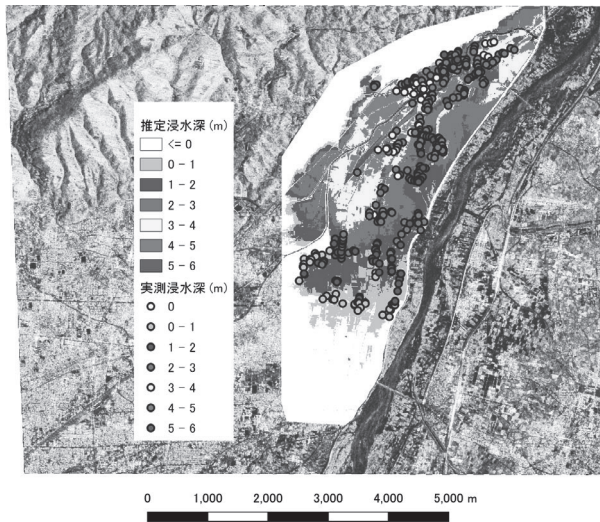


図-8 SARによる長野市穂保周辺の浸水深

この浸水域における仮想水面高とした。範囲内の地盤高と仮想水面高の差を推定浸水深として求めた。その結果を図-8に示す。ここで、図中の○は山口大学山本晴彦教授らの浸水痕跡調査の結果を浸水深分布と同様の浸水深階級で表示したものである。千曲川から西側に向かうほど地盤高は低くなるため、浸水深が大きくなることが分かる。実測値も概ねその傾向を表している。特に新幹線車両基地のある箇所では浸水深は4～5m程度であったことが分かる。

SARによる推定浸水深と実測浸水深の比較を図-9に示す。横軸はSARによる推定浸水深で、縦軸は実測浸水深である。この図面に傾き1:1の二等分線が描かれている。この線上にデータがプロットされれば両者の数値は一致していることになり精度が良好であることを意味する。データは概ね二等分線上に集まってはいるものの、散らばりも見受けられる。実測値と推定値の平均の相対誤差は28%であり、また平均の誤差値（絶対値）は57cm程度であった。二等分線から離れたところにあるデータが平均の誤差値を大きくしているものと考えられる。

図-10に実測浸水深から推定浸水深を引いた差を示す。推定浸水深が2mより大きい箇所では本解析による推定はよく実測に対応している。浸水が浅い箇所では推定値が実測値に対して低く見積もられている。これは、図-10から確認できるように、浸水範囲の上流側や、下流側でも支流浅川の左岸側の一部で仮想水面高が低く見積もられていることが影響している。

4. 飯山市・木島平村の浸水域・浸水深

本章では、前述の手法に沿って飯山市・木島平村

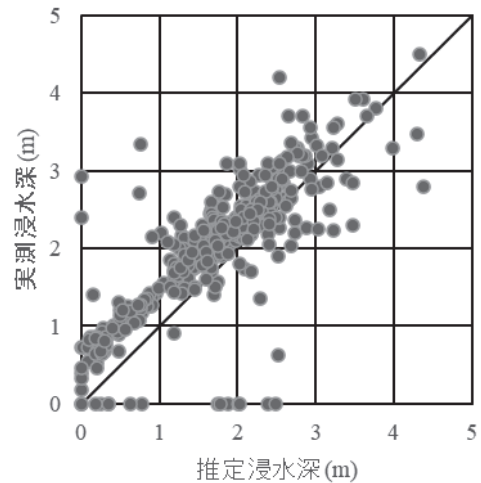


図-9 SARによる推定浸水深と実測浸水深の比較

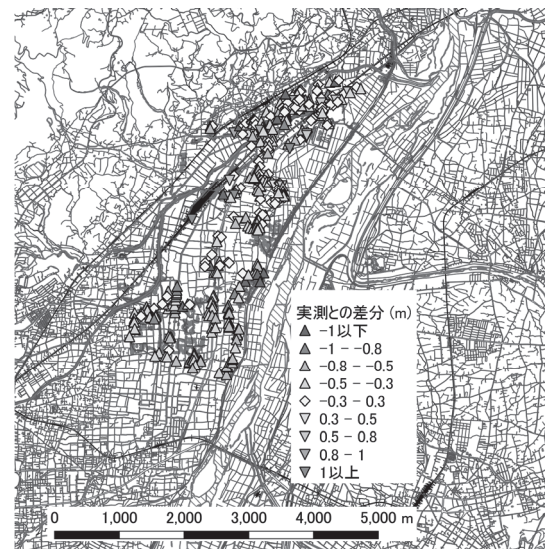


図-10 推定浸水深と実測浸水深の差

における浸水深分布を解析した結果を示す。解析にあたっては、図-11に示す1から6までの対象エリアごとに、その内部の水域を抽出し、水域ポリゴン境界の標高を参照して仮想水面高を決定した。赤く色づけされた領域を囲っている緑の線が浸水域に対応している。比較のため図-12に国土交通省（2020）国土地理院の浸水図を示す。

左岸側のエリア6、エリア1は国交省の浸水図でも浸水を確認できる。飯山市中心部のエリア3については、実際には浸水しているが、建物や家屋のため散乱強度が大きくSAR画像では浸水域とは判断されていない。

一方、右岸側では国交省浸水図では浸水域として示されていないが、千曲川支川の樽川右岸からの越水で住居1棟が一部損壊(長野県、2020)、発災直後

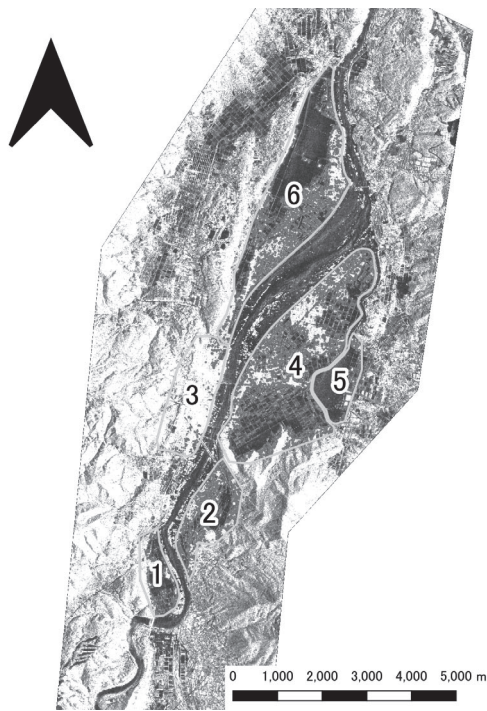


図-11 飯山市・木島平村の浸水域

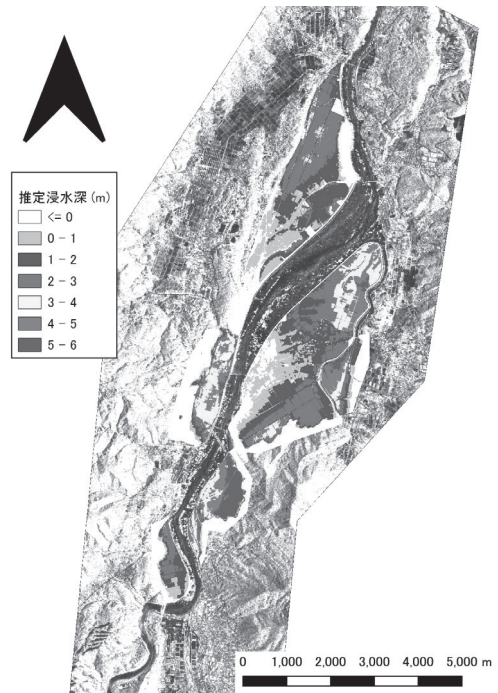


図-13 飯山市・木島平村の浸水深

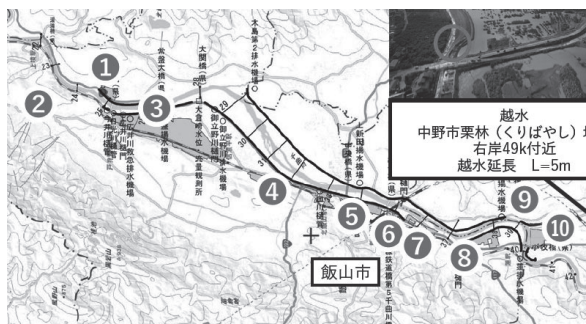


図-12 飯山市・木島平村の浸水図（国交省 2020）

に田畑が浸水した様子を収めた動画がSNSや動画投稿サイト上で共有されている。SARではエリア2, 4, 5が浸水域と判定されている。

図-13に3章と同様の方法で推定した浸水深分布を示す。この地区は実測浸水深が無いために、定量的な評価ができないため定性的な議論にとどめる。浸水深が大きいエリアは2, 3, 5となっている。エリア1と6は比較的浸水深は小さい。エリア4では全体的に浸水深は大きくはないが、北側の千曲川と接する部分近傍で浸水深が大きくなっている。これは電磁波の陰となる丘の斜面で水域と同じく低散乱となっている箇所を誤って水域として判断し、浸水域および仮想水面高を過大評価していると考えられる。これはエリア2や5も同様である。仮想水面高の選定にあたり、観測条件・地形に応じた重み付け等の対応などが必要である。

6. おわりに

本稿は台風19号による千曲川流域の氾濫域についてSAR画像を用いて解析を試みた結果を報告したものである。堤防破堤によって甚大な氾濫被害があった長野市穂保地区および飯山市周辺の浸水域および浸水深を解析した。浸水域については概ね正しく補足しているものと思われる。一方、浸水深については、穂保地区では実測浸水深に対して精度のバラツキはあるものの、比較の実測値を再現できているものと思われる。飯山市においては検証の実測データが不足しているため定量的評価はできないが、定性的には再現できているものと思われる。

精度向上のためには仮想水面高の正確な抽出が必要である。また本解析では氾濫水位は一定と仮定しているが実際は水面勾配がついている。このことも考慮に入れた解析が必要である。

謝 辞

本研究は自然災害協議会の令和元年突発災害調査費および科学研究費特別研究促進費（課題番号19K24678）の支援を受けた。また山口大学大学院創成科学研究科（農学系）の山本晴彦教授からは貴重な浸水深データの提供を受けた。ここに記して深甚

なる謝意を表します。

参考文献

大木 真人・渡邊 学・夏秋 嶺・本岡 毅・永井 裕人・田殿 武雄・鈴木 新一・石井 景子・伊藤 拓弥・山之口 勤・島田 政信（2016）：ALOS-2 PALSAR-2 データによる平成27年8月関東・東北豪雨の洪水域把握と精度検証，日本リモートセンシング学会誌，36 巻 4 号 p. 348-359.

国土交通省（2019）：台風19号による被災状況と今後の対応について，
<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001317859.pdf>

国土交通省（2020）：令和元年東日本台風記録誌，
<https://www.hrr.mlit.go.jp/bosai/higasinihontaihuu/2.pdf>

長野県：令和元年東日本台風(台風第 19 号)人的被害・住家被害の状況（令和 2 年 7 月 14 日現在），
<https://www.pref.nagano.lg.jp/bosai/kurashi/shobo/bosai/bosai/r1typhoon19/documents/200714taifuu19higai.pdf>

内閣府：令和元年台風第19号等に係る被害状況等について（令和 2 年 4 月 10 日 9:00 現在），
http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf.

持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究 ～コミュニティ・スクールを核とした防災まちづくり～

佐藤 健

東北大学災害科学国際研究所

要 旨

防災まちづくりの活動に取り組みながら、次世代を担う将来の地域人材を育成する活動モデルの確立が国際社会のニーズとなっている。学校と家庭、地域の連携に基づいた防災活動の事例調査と分析を行い、持続可能な防災活動のロールモデルについて探究を行った。その結果、コミュニティ・スクールの連携枠組みが導入された学校が中心となった地域の防災活動を展開することの有効性と持続可能性を見出すことができた。

1. はじめに

防災を含む多様なまちづくりに関する具体的な活動に取り組みながら、次世代を担う将来の地域人材を育成する地域活動モデルの確立は、第3回国連防災世界会議による仙台防災枠組の実現、および世界防災フォーラム／防災ダボス会議@仙台による実行委員長サマリーにも調和した重要な方向性である。この時、日本から世界に発信できる重要なキーワードは学校と地域との連携である。

我が国の「第2次学校安全の推進に関する計画」では、全ての学校において、保護者や地域住民、関係機関との連携・協働に係る体制を構築し、それぞれの責任と役割を分担しながら学校安全に取り組むことが求められている。そのための具体的な方策として、文部科学省は「学校運営協議会制度（コミュニティ・スクール、以下CSと表記）」や学校支援地域本部などの我が国の既存の連携枠組みを生かすことを推奨している¹⁾²⁾。CSは、学校にとってのメリットだけでなく、地域防災の推進や防災人材の育成にとっても高いポテンシャルを持つものとする。

しかし、我が国のCSの導入校はまだ多くはなく、CSとして連携枠組みを持っている学校であっても、防災を重点取組分野として位置付けているとは限らない。ましてや一般の学校では、一時期の管理職や担当者が熱心に推進したとしても、教員の異動や管理職の考え方ひとつにより、取組の継続性が確保されないことが少なくないという問題を常に抱えてい

る³⁾。

そこで、東日本大震災発生直後の頃からCSとして家庭、地域、関係機関等との連携・協働による防災の取組を継続的に展開してきている横浜市立北綱島小学校（以下、北綱島小学校と表記）の事例に着目する。北綱島小学校による取組の実績と活動モデルを通して、持続可能な防災まちづくりと防災人材育成にとって、CSの連携枠組みを活かして地域の防災活動を展開することの有効性と持続可能性を見出すことを本研究の目的とする。

本報告は、地域防災実践型共同研究「持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究」の最終成果のとりまとめである。

2. 研究方法と実施体制

2.1 研究方法

事例調査の方法を採用する。北綱島小学校への訪問や現地での活動参画を通して、活動モデルを丹念に分析し、持続可能な防災活動のロールモデルとしてのエッセンスを抽出する。

2.2 実施体制

研究の実施にあたっては、自然災害研究協議会東北地区部会と東北大学災害科学国際研究所防災教育国際協働センターの研究者コミュニティが中心となり、自治体関係者や地域防災リーダー、学校教員、一般市民とも連携した実施体制を構築した（表1）。

表1 实施体制

氏名	所属・職名
佐藤 健 (研究代表)	東北大学災害科学国際研究所・教授
風間基樹	東北大学大学院工学研究科・教授
河井 正	東北大学大学院工学研究科・准教授
柴山明寛	東北大学災害科学国際研究所・准教授
佐藤翔輔	東北大学災害科学国際研究所・准教授
定池祐季	東北大学災害科学国際研究所・助教
増田 聡	東北大学大学院経済学研究科・教授
片岡俊一	弘前大学理工学部・教授
松富英夫	秋田大学理工学部・教授
水田敏彦	秋田大学地方創生センター・教授
鎌滝孝信	秋田大学地方創生センター・准教授
村山良之	山形大学大学院教育実践研究科・教授
山本英和	岩手大学理工学部・准教授
千葉則行	東北工業大学工学部・教授
中村 晋	日本大学工学部・教授
小田隆史	宮城教育大学・准教授
飯藤将之	仙台高等専門学校・教授
桜井愛子	東洋英和女学院大学・准教授
林田由那	早稲田大学教育・総合科学学術院・助手
藤田悦生	宮城県危機対策課地域防災班・主幹
伊勢みゆき	NPO法人まなびのたねネットワーク・代表理事
大内幸子	仙台市地域防災リーダー
今野 均	仙台市片平地区まちづくり会・会長
武山 浩	グリーンキャピタル長町II・理事長
木村慎吾	仙台市立片平丁小学校・教諭(防災主任)
溝井貴久	仙台市片平地区まちづくり会・企画委員

注記) 表中の所屬・役職は平成30年度末時点のもの

2.3 具体的な調査方法

CSの連携枠組みを活かした学校が核となった防災の取組を分析するために、北綱島小学校の歴代の校長および関係教職員を通して、約10年間にわたる中期学校経営方針の変遷をはじめとする関係資料の収集を行った。

また、文部科学省、横浜市（教育委員会、総務局）、横浜市立北綱島小学校、内閣府防災教育チャレンジプランなどのウェブサイトから関連情報の収集を行った。さらに、北綱島小学校において2018年に開催された「地域防災拠点訓練」の現地調査を行った。

3. 結果

3.1 CSの概要とその特徴

(1) CSの概要

コミュニティ・スクール（学校運営協議会制度、略称CS）は、学校と地域住民等が力を合わせて学校の運営に取り組むことが可能となる「地域とともにある学校」への転換を図るための我が国の有効な仕組みである（図1）。CSでは、学校運営に地域の声を積極的に活かし、地域と一体となって特色ある学校づくりを進めていくことができる。

コミュニティ・スクールを導入した場合の地域住民にとっての魅力の一つとして、防災・防犯等の観点から、平素からの学校と地域の人々との関係づくりが地域の安全を守ることにつながることが挙げられている⁵⁾。

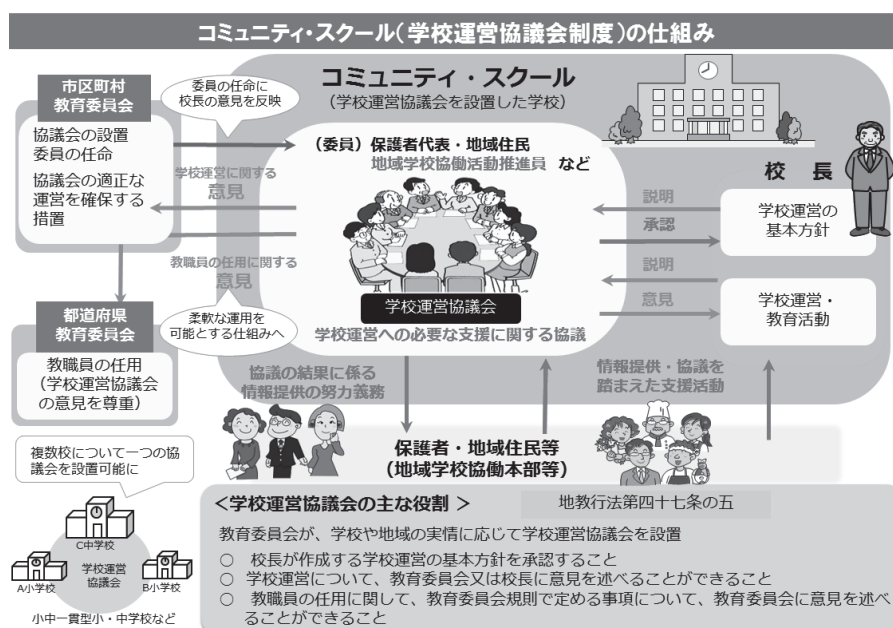


図1 コミュニティ・スクール（学校運営協議会制度）の仕組み⁴⁾

我が国のCSの指定・導入は、2004年から京都市立御所南小学校^{6)~8)}などの先進校から開始されて以来、2018年4月1日現在では、46都道府県内5,432校（幼稚園147, 小学校3,265, 中学校1,492, 義務教育学校39, 中等教育学校1, 高等学校382, 特別支援学校106）、全国の学校のうち、14.7%の学校にCSが導入された⁹⁾。本論で着目している北綱島小学校のある横浜市では、2018年度の市立小学校340校のうち、2018年4月1日現在のCS導入校は124校であるため、市立小学校へのCS導入率は36.5%となる。

(2) CSの特徴とその優位性

CSを導入することの地域社会にとってのメリット・魅力として、次の3点が挙げられている¹⁰⁾。

- ① 校長や教職員の異動があっても、学校運営協議会によって地域との組織的な連携・協働体制がそのまま継続できる「持続可能な仕組み」であること。
- ② 学校運営協議会や熟議の場を通して、子どもたちがどのような課題を抱えているのか、地域でどのような子どもを育てていくのか、何を実現していくのかという「目標・ビジョンを共有」できること。
- ③ 校長が作成する学校運営の「基本方針の承認」を通して、学校や地域、子どもたちが抱える課題に対して関係者が当事者意識をもち、「役割分担をもって連携・協働による取組」ができること。

一方で、学校と家庭、地域との連携による教育活動は決してCSだけではなく、多様な連携枠組みによる教育活動が国内外に存在する。我が国には、学校・家庭・地域が一体となって地域ぐるみで子どもを育てる体制を整えることを目的とした「学校支援地域本部」の活動や、学校教育による学習のみならず、地域・社会で行われている「社会教育」や「家庭教育」による学習なども含んだ包括的な概念である「生涯学習」の活動がある。各々に多くの実践の蓄積と発展を見ることができる。

その中で、上述したCSのメリットのうち、「持続可能な仕組み」と学校運営の「基本方針の承認」は、他と異なるCS特有の優位性と言える。従って、多様な学校外教育の中で活かされている人材を含む学習材を学校教育の中に積極的に組み込むことが可能な教育システムが日本のCSであると特徴づけることができる。また、CSで防災教育に取り組むことは、「地域に根ざした教育」と「学校外教育」が持つ優れた要素を、学校教育の中に融合させることができる高いポテンシャルを持つ教育活動になり得る。さらに、取組の継続性が確保されないという従来の問題に対する有力な解決策の一つになるとも考えられる。

3.2 北綱島小学校が核となった防災の取組

(1) 北綱島小学校の概要

北綱島小学校の開校は1978年4月である。令和元年度の一般学級数20、個別支援学級5、児童数666人となっている。北綱島小学校へのCS導入は2009年度からである。

北綱島小学校は、2011年度に「地域の自然と社会への理解を育て、学校・家庭・地域が連携して推進する防災教育」を研究主題とした実践研究を行った¹¹⁾。また、2012年度には内閣府の防災教育チャレンジプランの実践校として、「学校、地域、保護者が地域の災害想定を共有して取組む防災教育の推進」のテーマのもと、CSの連携枠組みを生かした防災教育を先駆けて実践した¹²⁾。

文部科学省が、一部の積極的な学校に限定することなく、全ての学校に学校安全の取組を求めた「第2次学校安全の推進に関する計画」の策定は、2017年3月のことである。北綱島小学校の防災の取組は、文部科学省の方針に先駆けているだけでなく、継続的かつ発展的な取組となっていることについては後述する。

(2) 北綱島小学校の重点取組分野

北綱島小学校の平成25（2013）年度版、平成30（2018）年度版、令和元（2019）年度版の中期学校経営方針における重点取組分野のうち、「安全防災教育」に関する具体的取組を表2に示す。いずれの年度についても、重点取組分野の数は8～10項目となっている中において、「安全防災教育」は共通して盛り込まれていることが確認できた。また、表2に示した2013（平成25）年度から2020（令和2）年度までの間に3人の校長が在任した中で、校長や教職員の異動に伴う防災の取組内容の減退がなく、単なる継続に留まらずに更に発展した取組となっていることが確認できる。

北綱島小学校において学校での防災の取組が位置付けられたのは、2011年度の頃からであるが、学校運営協議会において、ひとたび目標・ビジョンが共有されたならば、学校と家庭、地域とが連携した中での取組の継続性や安定性が確保されることが示唆された。

(3) 北綱防災プログラム

北綱島小学校の防災教育「北綱防災プログラム」について、2014（平成26）年度の年間取組方針を表3に示す。なお、これらの方針や計画は毎年度、見直しと策定がなされており、持続発展してきているものである¹³⁾。取組の初期段階における2014（平成26）年度の例で示す。

表2 北綱島小学校の中期学校経営方針における重点取組としての安全防災教育の変遷

年度	安全防災教育
2013.4 平成25年度 2016.3 平成27年度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 在校時間帯の震災に適切な対応ができる体制づくりと、身を守る児童の教育を推進しています。 ・ 帰宅後の被災に、地域、家庭との連携をもとに、自助、共助を実践できる防災教育を実践しています。 <p>※この期間の重点取組分野の名称は「防災教育」となっている。</p>
2016.4 平成28年度 2019.3 平成30年度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 在校時間帯の災害に適切な対応ができる体制づくりと、訓練の質の向上を図る。 ・ 学校、家庭、地域の連携のもと、「きたつな防災プラン」をPDCAサイクルで見直し、様々な危険から身を守る防災教育の充実を図る。
2019.4 令和元年度 2022.3 令和3年度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 「北綱安全防災プラン」に基づいた安全防災に関するカリキュラムの作成をする。全教科において、安全防災に関わる視点を取り入れていく。 ・ 地域保護者参画の学校総合防災訓練を実施し、「地域防災」をテーマに地域と学校の連携がより強化できるようにする。 ・ 新しい想定避難訓練を計画・実施していくことで、児童が主体的に判断し行動できるようにする。

注) 表中の下線太字は、学校防災に関連するキーワードを示す。

表3 平成26年度 防災教育「北綱防災プログラム2014」の年間取組方針

1.	持続可能で教育目的を達することのできる防災教育課程「きたつな防災・横浜の時間プラン」の策定と実施。
2.	児童も、保護者も、職員も育つ年間計画「防災教育プログラム」の策定とPDCAサイクルの確立。
3.	北綱防災マニュアルの策定とPDCAサイクルの確立
4.	保護者参加型の総合防災訓練の改善・土曜日の授業参観への要望に応え、父親も参加できる土曜日授業参観・避難訓練の参観・引き取り訓練の設定を実施する。
5.	地域防災拠点訓練への職員協働訓練。これまでの地域防災拠点訓練の成果を継続し、内容を精選。参加してよかったと思える訓練に。
6.	学校をコミュニティの拠点とした、地域防災コミュニティ構築への学校としての貢献。保護者防災リーダー（現在はPTA）のさらなる発展。
7.	中学校との連携、中学生の防災訓練参加の模索。

北綱島小学校では、学校運営協議会を基盤に、学校、家庭、地域が防災教育を協議する場として、「防災教育推進委員会」が創設された。PTA役員、各委員長、地域防災拠点運営委員会（説明は後述）、学校の参加により、防災教育の取組方針を協議している。この協議に基づいて、防災教育の年間取組計画「北綱防災プログラム」や、「北綱防災マニュアル」などの共通理解が確立されている。このように、北綱島小学校の防災の取組は、学校だけが単独で推進しているわけではなく、CSの連携枠組みを活かし、試行錯誤を繰り返しながらもCSのステークホルダーが各々の立場から主体的に関わっていることが確認できる。学校運営協議会や熟議の場を通して、3.1(2)で述べたCSを導入することの地域社会にとってのメリット・魅力としての、「持続可能な仕組み」、「目標・ビジョンを共有」、「基本方針の承認」のすべてが高度に体现された実例の一つが北綱島小学校であると言える。

(4) 北綱島小学校における地域防災拠点訓練

北綱島小学校では、北綱島小学校を会場に、関係機関・関係者の協力を得ながら学校と家庭、地域と

の合同防災訓練に先駆的に取り組んできている。なお、横浜市では、市立の小・中学校等を指定避難所に指定し、「地域防災拠点」という名称で呼ばれている。

2018年度に開催された北綱島小学校地域防災拠点運営委員会の主催による「地域防災拠点訓練」の現地調査を通して、活動モデルの有効性と持続可能性を考察した。ここで、北綱島小学校地域防災拠点運営委員会とは、学校・PTA代表者・地域（自治会・町内会）・区役所等で構成された地域防災拠点の運営をはじめとした防災活動のための連携組織である。

著者は2013年度にも同様の防災訓練を現地調査している¹⁴⁾。それから5年が経過し、管理職が代わり、教職員の異動があったとしても、その取組は更に発展していることが確認された。2018年度の訓練プログラムの詳細については、文献15に譲り、その中で重要なエッセンスのみを以下に述べる。

北綱島小学校の学校行事にも位置付けられた地域防災拠点訓練の参加者は、北綱島小学校の全校児童とその保護者、「地域防災拠点運営委員会」委員、北綱島小学校の全教職員、学校区の地域住民等であ

る。その中でも地域防災拠点訓練を主導し、当日の訓練指導者となっているのは、消防署職員や区役所職員ではなく地域防災拠点運営委員としてのPTAや地域住民である。彼らは一般の地域住民であるため、訓練指導者となるためには、事前に知識と技能を身に付ける必要があることは言うまでもない。地域住民の社会的自己実現の機会となっていることに加え、学校や地域のために活動する大人の姿を目にした子どもの中から、将来の学校と地域を支える地域人材が生まれると考えられた。

また、学校教員の指導により、児童が防災訓練を振り返る教室での学習活動の場面では、北綱島小学校の卒業生の中学生1名と高校生1名が来校し、その学習活動を支援した。自分の後輩となる児童に防災の取組の重要性についての講話を行った。北綱島小学校による継続的な防災活動の推進により、地域防災人材が育まれているエビデンスとも言える。このような先輩の姿を目にした児童の中からも次世代の地域防災人材が育まれると考えられた。

3.3 CSによる取組の継続性

第2次学校安全の推進に関する計画において、一部の積極的な学校に限定することなく、全ての学校に対して災害安全（防災）を含む学校安全の取組が求められるようになってきているとはいえ、防災管理の推進はともかく、未だ教科・領域となっていない防災教育の推進とその積極性、継続性の観点から残された課題は少なくない。

そこで、CSにより取組が継続される有効性を考察するために、横浜市港北区の小学校26校の中期学校経営方針（令和元年度～令和3年度）の重点取組分野の中で具体的取組に学校での防災に関連する内容を含む取組状況を調査した。公開情報として確認できた19校について以下に整理する。

19校のうち、重点取組分野として、「地域連携」、「学校運営協議会」、「地域連携・学校運営協議会」のいずれか、またはその組み合わせで挙げている学校は100%であった。その中で、具体的取組として防災管理や防災教育に関連した「防災（避難を含む）」のキーワードが明記されている学校は、わずか2校

（10.5%）となっている。また、重点取組分野に防災関連の項目名を直接的に設けている学校は、北綱島小学校を含め4校（21.0%）であった。この4校の重点取組分野は、「安全管理」2校、「安全防災教育」2校であった。一方で、19校中13校では、重点取組分野やその具体的取組として防災関連の取組が明記されていないことがわかった。すなわち、CS導入校だからといって、「防災」を重点取組分野に位置づけてはいないことや、「地域連携」や「学校運営協議

会」の重点取組分野とする中で、具体的取組で「防災」を明記する場合もあるがその割合はまだ少なく、一律に「防災」を位置づけているわけではない状況が確認された。なお、具体的取組に記載されていない場合でも、その学校において全く取組まれないというわけではないとしても、学校経営におけるウェイトは明確に位置付けられた場合との比較において一定の取組に留まることは否めない。その中で、北綱島小学校による防災の取組の具体性と取組内容の先進性を確認することができた。

なお、北綱島小学校は、コミュニティ・スクールを通じたこれまでの安全防災教育や地域の教育力を活用した学習活動の実践が評価され、平成30（2018）年度「地域学校協働活動」推進に係る文部科学大臣表彰を受賞した。CS導入校が先行して学校・家庭・地域が連携し、学校を核とした地域の防災活動の実践を蓄積し、高度化していくことは、一般の学校への普及と展開にとっても有益であるとともに、持続可能な防災まちづくりの実現にとっても有益であると考えられた。

4. まとめ

北綱島小学校の活動モデルを通して、CSの連携枠組みを活かした学校が核となった地域の防災活動を推進することの有効性と持続可能性を以下に整理する。

- ① CSのような連携枠組みが存在しない一般の学校の場合、管理職や推進者の異動などにより、学校と家庭、地域の連携に基づいた防災活動が学校の重点取組として継続されにくい。
- ② 学校が核となった防災の取組の推進と継続にあたり、我が国の既存制度であるCSは有効かつ持続可能な枠組みの一つである。
- ③ CS導入校である北綱島小学校が核となった防災の取組は、学校と家庭、地域とが相互の強みを生かし合った質の高い協働に基づいており、他の学校や地域が学ぶべきロールモデルである。
- ④ 学校の経営方針や重点取組目標に学校・家庭・地域が連携した防災活動を掲げ、CSの連携枠組みを活用した実践の蓄積は、持続可能な防災まちづくりと防災人材育成の副産物をもたらす。
- ⑤ CS導入校による地域の教育力の生かし方を含む連携方法とその具体的な取組は、CSが導入されていない一般の学校や他の地域コミュニティにとっても参考になる。

注 記

本論文は、著者が筆頭著者として日本自然災害学会の学会誌「自然災害科学」に投稿した「コミュニティ・スクールにおける学校防災の推進モデル～横浜市立北綱島小学校の事例～」(佐藤 健・桜井愛子・小田隆史・林田由那・村山良之・矢守克也)をもとに加筆、修正したものである。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、横浜市立北綱島小学校の前校長である鷺山龍太郎氏、同校長(現地視察当時)の昆しのぶ氏、同校長(現在)の基野啓司氏、北綱島小学校学校運営協議会、北綱島小学校学校地域防災拠点運営委員会および、北綱島小学校PTAのみなさまには多大なご協力と情報提供を頂きました。また、京都大学防災研究所の岩田知孝教授、矢守克也教授には、貴重なご意見を賜りました。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 文部科学省：第2次学校安全の推進に関する計画，pp.26-27，平成29年3月24日
http://www.mext.go.jp/a_menu/kenko/anzen/1383652.htm，2019年5月24日
- 2) 文部科学省：「生きる力」をはぐくむ学校での安全教育(改訂第2版)，pp.111-114，平成31年3月
- 3) 鷺山龍太郎：能動的学校経営の一環としてのファイシタブルな地域連携と安全，日本安全教育学会第20回山形大会プログラム・予稿集，pp.24-25，2019.
- 4) 文部科学省：コミュニティ・スクール(学校運営協議会制度)
<https://manabi-mirai.mext.go.jp/torikumi/chiiki-gakko/cs.html> (2019年5月24日アクセス)
- 5) コミュニティ・スクールの推進等に関する調査研究協力者会議：コミュニティ・スクールを核とした地域とともにある学校づくりの一層の推進に向けて～全ての学校が地域とともにある学校へと発展し，子供を中心に据えて人々が参画・協働する社会を目指して～参考資料，pp.47，2015.
- 6) 御所南コミュニティ京都市立御所東小学校研究同人：学校大好き！コミュニティ・スクール 学

校が変わる 人が変わる，御所南コミュニティ，2009.

- 7) 金子郁容：日本で「一番いい」学校—地域連携のイノベーション，岩波書店，2008.
- 8) 京都市立御所南小学校：地域社会の参画によるカリキュラム開発，特色ある学校づくりのための新しいカリキュラム開発 第4巻 学校間・学校内外の連携を進める，ぎょうせい，pp.18-193，2004.
- 9) 文部科学省：平成30年度コミュニティ・スクールの導入状況(概要)
https://www.mext.go.jp/content/1405722_01_1.pdf (2019年5月24日アクセス)
- 10) 文部科学省：コミュニティ・スクールのつくり方(学校運営協議会設置の手引き)(令和元年度改正版)
https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/community/school/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/10/08/1361007_001_1.pdf (2019年5月24日アクセス)
- 11) 横浜市立北綱島小学校：平成23年度学校運営協議会設置校(コミュニティスクール)防災教育実践研究報告
http://www.bosai-study.net/2012houkoku/data_1/seisaku6-1.pdf (2019年5月24日アクセス)
- 12) 内閣府防災教育チャレンジプラン：防災教育事例集(横浜市立北綱島小学校最終報告書)
http://www.bosai-study.net/2012houkoku/data_1/houkoku6.pdf (2019年5月24日アクセス)
- 13) 横浜市立北綱島小学校：平成29年度横浜市ESDコンソーシアムESD推進校公開授業研究会資料編(きたつな安全防災プログラム，きたつな安全防災プラン一覧(資質・能力標)ほか)，2017.
- 14) 佐藤 健：横浜市立北綱島小学校における学校と家庭・地域との連携に基づく防災訓練，日本安全教育学会第14回浦安大会プログラム・予稿集，pp.52-53，2013.
- 15) 佐藤 健：持続可能な防災まちづくりと防災人材育成に関する研究，第56回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，pp.45-52，2019.

第 57 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2020 年 9 月 1 日

発行：京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長：釜井 俊孝（京都大学防災研究所）

渦岡 良介（京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務）

（お問い合わせ）電話：0774－38－4347

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/contents.html>